



**HAL**  
open science

**Circulation de fluides aux abords de failles d'échelle  
crustale : contraintes structurales, microtectoniques,  
inclusions fluides et géochimiques sur les processus de  
formation du gisement de Bou Azzer (Ni-Co),  
Anti-Atlas, Maroc**

Enora Tourneur

► **To cite this version:**

Enora Tourneur. Circulation de fluides aux abords de failles d'échelle crustale : contraintes structurales, microtectoniques, inclusions fluides et géochimiques sur les processus de formation du gisement de Bou Azzer (Ni-Co), Anti-Atlas, Maroc. Sciences de la Terre. Université Montpellier, 2019. Français. NNT : 2019MONTG064 . tel-02542128

**HAL Id: tel-02542128**

**<https://theses.hal.science/tel-02542128>**

Submitted on 14 Apr 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

En Sciences de la Terre

École doctorale GAIA

Unité de recherche Géosciences Montpellier

**Circulation de fluides aux abords de failles d'échelle  
crustale : contraintes structurales, microtectoniques,  
inclusions fluides et géochimiques sur les processus de  
formation du gisement de Bou Azzer (Ni-Co), Anti-Atlas,  
Maroc**

**Présentée par Enora TOURNEUR**

**Le 28 Novembre 2019**

**Sous la direction de Alain CHAUVET**

**Devant le jury composé de**

Delphine, BOSCH, Présidente du jury, Directrice de Recherche, à Géosciences Montpellier

Yannick, BRANQUET, Maître de Conférences, HDR, à l'ISTO, Orléans

Alexandre, TARANTOLA, Maître de Conférences, HDR, au laboratoire Georessources, Nancy

Michel, DE SAINT BLANQUAT, Directeur de Recherche, Géosciences Environnement Toulouse

Kalin, KOUZMANOV, Assistant Professor, HDR, Department of Earth Sciences, Genève

Alain, CHAUVET, Directeur de Recherche, à Géosciences Montpellier

Marc, LEBLANC, Directeur de Recherche, à Géosciences Montpellier (Retraité)

Examinatrice

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Examineur

Directeur de thèse

Invité



**UNIVERSITÉ  
DE MONTPELLIER**



« A chacun, l'âge venu, la découverte... ou l'ignorance ! »  
Tri Yann



## Résumé

Le district de cobalt-nickel de Bou Azzer, localisé au Maroc, est un gisement unique au monde mis en place dans un environnement de serpentinite carbonatée. Deux types de minéralisations sont exploités : des minéralisations massives et un système de veines.

Les minéralisations massives sont des corps métalliques, sous forme de lentilles, orientées N120°E et essentiellement enrichies en arséniures de nickel et de cobalt. Elles sont localisées au contact entre une serpentinite, une diorite quartzique ou des roches volcaniques précambriennes. Leur mise en place se fait dans des conditions de moyennes températures (à 220°C en moyenne), de fortes salinités à 38%pds eq. NaCl et de pressions variables entre 67-2883 bars.

Le système de veines est contrôlé par des failles systématiquement minéralisées en arséniures de cobalt et de fer lorsqu'elles recoupent les minéralisations massives. Ces failles recoupent toutes les unités lithologiques de la boutonnière de Bou Azzer, sauf la formation sédimentaire cambrienne. Elles ont des orientations oscillants entre N/S à N 070°E et sont systématiquement associées à un mouvement normal observé dans le plan vertical. Dans le plan horizontal, les failles minéralisées présentent des jeux sénestres ou dextres cohérents avec un contrôle transtensif selon une direction de raccourcissement orientée N030°E. Le fluide du système de veines décrit des températures à 170°C en moyenne des salinités entre 32 et 41 %pds eq. NaCl et des pressions variant de 24 et 1800 bars. Les trois types de structures décrivent la même paragenèse minérale, les mêmes textures et les mêmes types de gangues encaissant les minéralisations (quartz et carbonates). Le système évolue de fluides riches en Ni-(Co-Fe) à des fluides riches en Co-(Ni-Fe) depuis les minéralisations massives jusqu'aux systèmes des veines induisant un continuum dans la formation de ces deux types de minéralisations.

Deux types de textures sont également observés au sein des minéralisations massives : i) une texture Bréchifiée des Minéralisations Massives (BMM) et une texture Laminée des Minéralisations Massives (LMM). La BMM est illustrée par des arséniures de nickel et de cobalt fracturés par de la serpentine, par des fragments résiduels de serpentinite, des reliques de spinelles et des fragments d'arséniures de nickel isolés au sein de la gangue carbonatée. La texture de la gangue traduit le fait que ces lentilles minéralisées sont certainement d'anciens corps bréchifiés d'une gangue précoce de serpentinite et des reliques de spinelles. La LMM est décrite par des niveaux alternant entre des arséniures de nickel et de la gangue carbonatée. Cette texture traduit l'architecture précoce du contact faillé sous forme d'anciens lits de spinelles remobilisés par le fluide minéralisateur.

Les analyses géochimiques menées sur les arséniures, les gangues carbonatées, les spinelles et le fluide montrent un enrichissement commun en Co, Ni, As, Zn, Bi, Cu, Ag et Au et la même signature en Na/K, Li/B, V/Cr, As/V, Zn/V, Co/Cr. La relation étroite entre ces minéralisations et leurs encaissants indique que le lessivage des fragments de serpentinite pré-existants (spinelles et arséniures de nickel) par un fluide minéralisateur et la précipitation in-situ des métaux sont les processus à l'origine des gisements de cobalt-nickel de Bou Azzer.

La formation précoce de la gangue de serpentinites résulterait d'un amincissement crustal en contexte hyper-extensif en transtension décrit il y a 540-560 Ma et accompagné d'un début d'océanisation lors de la formation du complexe supérieur. La circulation d'eau de mer dans le manteau serait l'agent principal de sa serpentinitisation. L'exhumation serait le vecteur de la remontée et de la bréchification de la serpentinite mise en contact avec une diorite quartzique. Le timing de formation des minéralisations de Bou Azzer débiterait avec le processus de serpentinitisation, décrit pendant les premiers stades de la formation des minéralisations.

Mots-clés : Hydrothermalisme, Paléofluides, District de Bou Azzer, Cobalt, Serpentinite, Exhumation



---

## Abstract

The Co-Ni district of Bou Azzer (Anti-Atlas, Morocco) is a unique and particular type of deposit because formed in a context of a carbonated serpentinite. Two types of mineralisation are exploited: massive orebodies and a system of veins.

The massive mineralisation consists of lenticular metallic bodies, oriented N120°E and essentially enriched in Ni- and Co-arsenides. They are located at the contact between serpentinite, quartz diorite and Precambrian volcanic rocks. They were formed of moderate temperatures (*ca.* 220°C), high salinity (38% wt NaCl eq.) of the fluids and pressures between 67 and 2883 bars.

The vein system is controlled by faults that are systematically mineralised in Co- and Fe-arsenides when they intersect the massive mineralisation. These veins intersect all lithologic units of the Bou Azzer inlier, except for the Cambrian sedimentary formation. They are trending between NS to N070°E and are systematically associated with normal movements in vertical planes. In the horizontal plane, the mineralised faults present sinistral or dextral motions coherent with a transtensive context controlled by a N030°E shortening direction. Associated fluid yields minimum temperatures of emplacement of 170°C in average, salinity between 32 and 41% wt NaCl eq. and pressures ranging from 24 to 1800 bars.

All structures describe the same mineral paragenesis, similar textures and are associated with similar gangues (quartz and carbonates). Fluids evolve from Ni-(Co-Fe) rich end-member to Co-(Ni-Fe) rich one, from massive mineralisation to vein formation indicating a continuum in the formation of both mineralisation types.

Two types of textures are observed in massive mineralisation: a Brecciated Massive Mineralisation (BMM) texture and a Laminated Massive Mineralisation (LMM) one. BMM is characterised by: i) Ni-/Co-arsenides fractured by serpentine; ii) residual fragments of serpentinite, iii) relictic spinel and iv) fragments of Ni-arsenides isolated within the carbonated gangue. The texture of the gangue reflects the fact that these mineralised lenses are certainly previously formed brecciated bodies of an early gangue of serpentinite and spinel relicts. The LMM is described as alternating Ni-arsenides and carbonated gangue layers. The combination of these two textures reflects the early architecture of the faulted contact, i.e. the BMM are ancient brecciated bodies whereas the LMM are witness of ancient mylonitic levels.

Geochemical analyses carried out on arsenides, carbonates, spinels and fluid inclusions show a common enrichment in Co, Ni, As, Zn, Bi, Cu, Ag and Au and the same signatures of Na versus K, Li versus B, V versus Cr, As versus V, Zn versus V, Co versus Cr. The close relationship between these mineralisations and their host-rocks indicates that the leaching of pre-existing ultramafic fragments (spinel and Ni-arsenides) by a mineralising fluid and the in-situ metal precipitation are the processes at the origin of the Co-Ni ore at Bou Azzer.

The early formation of the brecciated serpentinite host rock is interpreted as a result of crustal thinning in a hyper-extensional context that occurred around 540-560 Ma and accompanied by an initiation of oceanic crust formation. The circulation of seawater in the mantle would be the main agent of its serpentinisation. The exhumation would be the vector of the rise and the brecciation of the serpentinite put in contact with a quartz diorite. Consequently, the formation of the Bou Azzer mineralisation would begin with the serpentinisation process, described during the early stages of the mineralisation process and ended by tectonically controlled vein formation.

Keywords: Hydrothermalism, Paleofluids, Bou Azzer district, Cobalt, Serpentinite, Exhumation





Comme je ne sais pas comment vous le dire, je vous l'écris : merci !

Tout d'abord, je tiens à remercier les rapporteurs de mon jury, Alexandre Tarantola, Yannick Branquet, mais également Delphine Bosch, Michel De Saint Blanquat et Marc Leblanc pour avoir accepté d'évaluer mon projet de thèse.

Je tiens particulièrement à remercier Alain Chauvet de m'avoir donné l'opportunité de travailler sur des systèmes minéralisés. Cette thèse s'est déroulée exactement comme je l'espérais à travers beaucoup de terrain au Maroc (7 semaines entre Marrakech, Ouarzazate, Bou Azzer et Imiter) ; de minéralogie, de géochimie fine sur les fluides. Cette thèse est complète et j'ai pris un grand plaisir à travailler avec toi, à discuter autour de cafés. Je retiens deux choses : ton humour inimitable et que les petits pois ne supportent pas la médiocrité. Je tiens à remercier chaleureusement l'encadrement que j'ai reçu auprès de Kalin Kouzmanov, Johann Tuduri et Stanislas Sizaret. Grâce à vos soutiens, nos discussions, pendant la thèse, lors de congrès ou lors de nos réunions à Genève ou Orléans, j'ai pu finir cette thèse et la vivre sereinement. Merci à Marc Poujol pour le temps consacré à Rennes sur les datations. Merci à Thierry Michel pour les analyses Raman. Merci à Oscar Laurent pour les analyses ICP-MS à l'ETH de Zurich.

Merci à tous les géologues et personnels de Managem travaillant aux mines d'Imiter et de Bou Azzer. J'ai rencontré des personnes extrêmement accueillantes, riches et ayant toujours le sourire. Je pense plus particulièrement à Younes Moundi, Responsable géologue de la partie Ouest de Bou Azzer, Mohammed Imloui, géologue, Lhou Zhar, mineur, El Ouargui El Houcine, géologue, Zaid Daoud, responsable Bou Azzer Est P6, Mohammed Ouhasi, ingénieur, Sara Hosni, la responsable d'hygiène et sécurité ou encore Mohammed Chami, agent de sécurité, pour nos discussions, surtout sur les minéralisations, mais aussi sur la religion, la vie au Maroc, la vie à la mine, ...

Merci à mon co-bureau Alexandre. Tu m'as supporté pendant trois ans, tu m'as laissé chanter à tue-tête, tu m'as sauvé la vie quand j'avais oublié mes « lames » avant de partir à Genève, tu m'as accompagné à l'autre bout du monde (heureusement qu'on travaille sur les mêmes thématiques).

Merci de ton soutien aussi. On en a passé de bons moments et ce ne seront pas les derniers. Merci à tous les doctorants et post-doctorants de Géosciences Montpellier (Lucan, Julie, Romain L., Maxime, Sylvain, Séverine, Mathieu, Caroline, Clément, Nestor, Megan, Oswald, Timothée, Xin lang, Annea, Stéphan, Agathe, Adeline, Maël, Romain H.). Vous êtes une source de chaleur et de bonheur ! Merci pour ces bons moments passés en votre compagnie (Laser Games, Cinéma, Plage, Molky,...).

Merci à vous : Gaétan, Justine, Camille, Christine, Asma, Lionel, Arthur, Thierry, Julia, Lauranne et Rémi. Merci de votre soutien inébranlable, de vos sourires, de nos fous rires, de ces soirées inoubliables. Il s'en passe des choses en trois ans. On rencontre chaque année de nouvelles personnes, on boit un verre, on discute, on apprend à les connaître et on se lie à eux. Et ces liens seront impossibles à oublier.

Merci à ma famille, à mes parents, à ma sœur jumelle, à mes grands-parents, à ma tante, mon oncle et leur deux enfants, qui ont été là, malgré les quelques 1000 kilomètres qui nous séparent. Vous avez été présent tout le long, à croire en moi, à me porter vers le haut, à essayer de comprendre ce sur quoi je travaillais. Ce sont de beaux cailloux qui brillent et qui racontent une histoire.

Merci.



## Table des matières

<b>Chapitre I : Introduction générale .....</b>	<b>15</b>
A. Problématique scientifique de l'étude .....	17
1. Cadre de l'étude.....	17
2. Préambule.....	18
3. Généralités sur les gisements de cobalt.....	19
4. Le problème des serpentinites de l'Anti-Atlas .....	21
5. Objectifs de la thèse .....	24
B. Contexte géodynamique, géologique et métallogénique de l'Anti-Atlas Marocain.....	25
1. Localisation et description géodynamique de l'Anti-Atlas Marocain.....	25
2. Cadre et contexte géologique des boutonnières composant l'Anti-Atlas.....	27
3. Contexte géodynamique de l'Anti-Atlas .....	39
4. Métallogénie des boutonnières de l'Anti-Atlas .....	43
 <b>Chapitre II : Etude pétro-structurale du gisement de Bou Azzer.....</b>	 <b>49</b>
A. Introduction .....	51
1. Problématique.....	51
2. Méthodologie.....	51
B. L'étude pétro-structurale des minéralisations de Bou Azzer .....	55
1. Observations de surface.....	55
2. Observations en profondeur .....	66
3. Altération.....	88
C. Valorisation des données – article scientifique en révision .....	93
1. Introduction .....	94
2. Geological setting.....	96
3. Methods.....	101
4. Macroscopic study of the Bou Azzer mineralisation.....	102
5. Mineralogical and textural description of the Bou Azzer ore deposit .....	113
6. Discussion .....	124
7. Conclusion.....	135

**Chapitre III : Pétrographie et géochimie des inclusions fluides..... 143**

A. Introduction .....	145
B. Méthodes analytiques .....	145
1. Pétrographie des inclusions fluides .....	145
2. Cathodoluminescence.....	146
3. Microthermométrie des inclusions fluides .....	147
4. Spectrométrie Raman .....	148
5. Analyse LA-ICP-MS par ablation laser .....	149
C. Pétrographie des inclusions fluides .....	151
1. Les minéraux hôtes : le quartz et la calcite.....	151
2. Description des inclusions fluides .....	154
3. Mesures microthermométriques des inclusions fluides.....	162
4. Données Raman.....	169
5. Les inclusions solides.....	169
D. Analyses in-situ des fluides par LA-ICP-MS.....	171
1. Concentrations en éléments « majeurs et traces » des IFs.....	171
2. Distribution et teneurs relatives des éléments « majeurs et traces » dans les IFs.....	174
3. Analyses des « métaux » dans les IFs .....	175
4. Distribution et teneurs relatives des « métaux » dans les IFs .....	179

**Chapitre IV : Géochimie in situ des minéralisations de Bou Azzer ..... 181**

A.Introduction .....	183
B.Méthodes analytiques .....	185
1.La microsonde électronique .....	185
2.L’analyse LA-ICP-MS sur minéraux .....	186
C.Résultats de l’étude géochimique in-situ des arséniures et des sulfures de Bou Azzer.....	190
1.Les arséniures .....	190
2.Les sulfures.....	194
D.Analyse géochimique des carbonates et des spinelles.....	195
1.La gangue carbonatée.....	195
2.Les spinelles .....	206

<b>Chapitre V : Géochronologie .....</b>	<b>209</b>
A. Introduction .....	211
B. La méthode de datation U/Pb .....	211
C. Les minéraux étudiés .....	214
1. Calcite.....	215
2. Apatite .....	216
3. Titanite.....	218
D. Résultats .....	218
1. Calcite.....	218
2. Apatites.....	220
3. Titanite.....	223
<b>Chapitre VI : Le gisement de Bou Azzer - Résultats principaux, discussion et conclusions .....</b>	<b>225</b>
A. Résultats principaux .....	227
1. Modèle pétro-structural des minéralisations de Bou Azzer.....	228
2. Étude des inclusions fluides .....	231
3. Etude géochimique des métaux et de la gangue encaissante.....	233
4. Géochronologie .....	234
B. Modèle de formation et de mise en place du gisement de Bou Azzer.....	235
C. Discussion sur le gisement de Bou Azzer .....	240
1. Comparaison entre les différents types de minéralisation .....	240
2. Contraintes physico-chimiques des fluides minéralisateurs.....	246
3. Lien entre minéralisation, gangue carbonatée, spinelle, fluide et serpentinite.....	250
4. Implications sur la tectonique et la géodynamique de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara.....	256
5. Source et origine du fluide .....	260
6. Classification et type de gisement .....	266
<b>Chapitre VII : Conclusions et perspectives .....</b>	<b>267</b>
A. Conclusions générales .....	269
B. Perspectives de l'étude .....	270
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>273</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>301</b>



# **Chapitre I : Introduction générale**





## A. Problématique scientifique de l'étude

### 1. Cadre de l'étude

Le travail de la thèse s'est à la fois déroulé sur les sites miniers d'Imiter et de Bou Azzer grâce à la société minière marocaine MANAGEM (nombreuses missions de terrain en conditions de mine en activité, travail de fond et de surface) mais également en laboratoire, sur le site de l'Université de Montpellier au laboratoire Géosciences Montpellier (analyse structurale, microtectonique, cathodoluminescence, EPMA, inclusions fluides, Raman), de l'Université de Genève (cartographie QEMSCAN, cathodoluminescence froide et MEB) et de l'ETH de Zurich (laser ICP-MS et microchimie).

Ce travail de recherche s'organise autour de huit parties présentant :

Le **chapitre I** présente l'introduction générale et comprend le cadre géodynamique, géologique et métallogénique de l'Anti-Atlas Marocain, la problématique de l'étude et les généralités concernant les différents gisements de Co et les modalités d'exhumation du manteau en contexte intracontinental. L'intérêt est, en comprenant le contexte géologique de l'Anti-Atlas et en intégrant l'étude détaillée du mode de formation du gisement de Co-Ni de Bou Azzer, de discuter de sa place au sein de l'histoire régionale liée à l'Anti-Atlas Marocain.

Le **chapitre II** présente l'étude pétro-structurale du gisement de Bou Azzer valorisée dans une publication scientifique soumise dans *Ore Geology reviews*. Suite aux nombreuses questions toujours posées sur la formation et l'origine du gisement de Co/Ni de Bou Azzer, l'étude pétro-structurale, texturale et minéralogique permettra d'apporter une vision générale, précise et détaillée des différents types de minéralisations exploitées à Bou Azzer et apporte des résultats préliminaires sur l'évolution géodynamique du gisement et de la boutonnière. Les conséquences sur le modèle de formation du dépôt seront discutées à partir de la nature des contacts entre les différents types de gisement. Si Leblanc (1975) a établi un travail important et conséquent sur toute la boutonnière de Bou Azzer – El Graara permettant de définir le gisement de Bou Azzer comme un type unique de gisement de cobalt, l'intérêt de ce travail sera d'approfondir la compréhension de la relation entre les minéralisations massives (anciennement « Amas ») et les veines (anciennement « Croiseur ») d'un point de vue minéralogique, texturale et géochimique et ce, depuis l'échelle de l'affleurement à celle de la lame mince.

Le **chapitre III** caractérise la pétrographie et la géochimie des inclusions fluides (IFs) basées sur l'étude pétro-structurale des minéralisations de Bou Azzer. L'étude de la pétrographie, de la microthermométrie et des concentrations en éléments en traces et en métaux des inclusions fluides a pour objectif de comprendre l'origine des minéralisations de Bou Azzer et mais également les mécanismes contrôlant la mise en place des minéralisations de Co et de Ni.

Le **chapitre IV** est consacré à la géochimie in situ des minéralisations. En complément de l'analyse géochimique des fluides faite au chapitre III, il a semblé nécessaire d'étudier également les concentrations en élément majeurs, traces, terres rares et métaux des phases silicates, des carbonates et des arséniures. Des analyses laser ICP-MS in situ des arséniures, des différentes générations de phases minérales de la gangue encaissante (calcite) et des spinelles compris dans la gangue et dans la serpentinite ont donc été entreprises afin d'apporter des éléments de réponse quant à la signature chimique et l'origine des différentes structures minéralisées.

Le **chapitre V** expose les résultats issus de la tentative de datations absolues effectuées sur plusieurs objets en lien avec les minéralisations tels que la gangue carbonatée des structures de Bou Azzer, les apatites associées à la diorite quartzique ou les titanites observés dans la diorite quartzique.

Le **chapitre VI** présente la discussion finale sur le modèle de formation des systèmes minéralisés en présence de serpentinites tectonisées, en prenant l'exemple de la mine de Bou Azzer.

Le **chapitre VII** comprend les conclusions et les perspectives de ce travail.

## 2. Préambule

La pluralité des hypothèses et l'absence de modèles complets sur la mise en place des minéralisations dans le contexte géologique de la boutonnière de Bou Azzer montrent qu'aucun consensus n'a été obtenu que ce soit, sur le type de minéralisation, sur son âge ou sur son origine : hydrothermal, magmatique, sédimentaire, météorique ou mixte. Ces questionnements se retrouvent également à l'échelle du modèle géodynamique de la boutonnière de Bou Azzer. L'objectif de ce travail n'est pas de trancher sur les différentes hypothèses proposées dans la littérature, ce qui pourrait paraître ambitieux au regard des travaux antérieurs, mais d'apporter de nouveaux éléments de réponse à ces problèmes scientifiques de premier ordre, au moyen d'une étude structurale détaillée, combinée à la caractérisation minéralogique fine des objets, aux études des inclusions fluides et à l'obtention de données géochimiques ciblées peut éventuellement amener des éléments de réponse. Il subsiste notamment deux problèmes essentiels :

- la caractérisation du type de dépôt qui demeure encore inconnu et incompris à ce stade, tellement singulier que l'on peut se demander s'il ne s'agit pas d'un dépôt unique.
- la compréhension de l'évolution structurale et géodynamique de la boutonnière qui semble montrer de nombreuses incohérences et complexités au regard des suggestions d'interprétation géodynamiques nombreuses et variées.

Le premier point est celui sur lesquels nous présenterons des avancées significatives sur la compréhension du district minéralisée de Bou Azzer. Des éléments de réponses seront néanmoins apportés concernant les questions sur la géodynamique de la boutonnière.

### 3. Généralités sur les gisements de Cobalt

Le cobalt (Co) est un élément important avec plusieurs applications industrielles variées : la production de batteries rechargeables (50%), la production de superalliages (18%) ou d'aimants (3%), ainsi que d'une variété de produits chimiques ayant des applications aussi diverses que les catalyseurs, les adhésifs, les pigments et les produits pharmaceutiques (Hawkins, 2001 ; BRGM, 2017). Une demande croissante des besoins en cobalt est observée et ne devrait pas diminuer dans un avenir proche (Seddon, 2001 ; Hawkins, 2006). Le Co est dispersé dans la croûte continentale où le *clarke* s'élève à 25 g/tonne (*clarke* = teneur moyenne du Co dans la croûte continentale). Différents processus permettent la concentration du métal dans des gisements potentiellement exploitables : la différenciation magmatique, l'altération chimique ou l'activité hydrothermale. Ces dépôts se trouvent dans des roches dont l'âge varie du Précambrien à des âges récents. Le Co est presque toujours exploité comme un sous-produit du Cuivre (Cu) ou du Nickel (Ni). La seule exception est le gisement cobaltifère et nickélifère de Bou Azzer qui héberge la seule mine au monde où le Co est produit en tant que produit primaire. Cinq principaux types de gisement de Co sont actuellement identifiés et associés à différents contextes géologiques :

- 1) Les *gisements de Cu-Co stratiformes* sont encaissés dans les sédiments, tels que la ceinture de Cu Centrafricaine en République démocratique du Congo (gisement de Katanga Crescent) et en Zambie, dans lesquelles le Cu et le Co sont produits par des processus diagénétiques (Cailteux et al., 2005 ; Hitzman et al., 2012). Ils représentent 34 % des ressources de Co au monde (Sweeney et al., 1991 ; Lhoest, 1995 ; Smith, 2001). L'origine du Co et du Cu du gisement de Katanga proviendrait des roches du socle métasédimentaire. Ces métaux seraient transportés par des fluides profonds et de surface, précipités sous forme de sulfures et de sulfates par réduction bactérienne à des températures inférieures à 100°C (Sweeney et al., 1991).
- 2) Les *gisements de sulfures magmatiques* tels que les districts de Noril'sk-Talnakh en Russie (Karzavin & Voloshina, 2001; Chukanov et al., 2002; Gavrilenko et al., 2002; Kravtsova et al., 2002; Marakushev et al., 2002), de Sudbury au Canada (Lightfoot et al., 2001), ou encore de Kambalda en Australie (Arndt et al., 2005 ; Naldrett, 2005) sont généralement riches en Ni et en Cu. Ils sont exploités pour la pentlandite et la chalcopyrite. L'exploitation des métaux du groupe du platine (MGP ou PGE en anglais) et du Co en sous-produit est courante dans les sulfures.
- 3) Les *profils latéritiques de roches ultramafiques* sont enrichis en Ni, Co, Fe et Al, tel que le gisement de Koniambo en Nouvelle-Calédonie (Butt & Cluzel, 2013, Freyssinet et al., 2005). L'exploitation annuelle du Co de ces derniers gisements sont élevées (jusqu'à 2531 tonnes de Co), ainsi qu'en Ni, en fer (Fe) et en aluminium (Al) (rapport d'activité 2016, IEOM).

- 4) Des gisements cobaltifères peuvent également être associés à des *nodules* de Mn et d'*encroutements riches* en Co sur le fond océanique, issus de processus sédimentaires concentrant le Co (exemple du gisement de Bungonia) (Hein & Koschinsky, 2000, Manheim & Lane-Bostwick, 1988).
- 5) Les gisements filoniens polymétalliques hydrothermaux et volcanogènes de type «five-element veins» (Bi-Co-Ni-Ag-U) sont caractérisés par l'association d'arséniures de Ni-Co, d'argent (Ag) natif, de bismuth (Bi) natif, d'uranium (U) et d'arsenic (As) natif encaissés dans une gangue de carbonate (Bastin, 1939 ; Halls & Stumpfl, 1972 ; Kissin, 1992). Ce type de gisement est défini par le remplissage de failles par des arséniures de Co et de Ni associés avec des minéraux natifs (Ag, As, Bi) dans une gangue généralement carbonatée. Ce type de gisement est fréquemment associé à un contexte de rifting continental et à de l'amincissement crustal (Kissin, 1988 ; Markl et al., 2016 ; Burish et al., 2017). Ce dernier type est celui qui a été ciblé comme le plus représentatif du dépôt de Bou Azzer dans les publications les plus récentes et sera discuté dans cette thèse.

Ce type de gisement est également caractérisé par le remplissage de veines liées à des processus hydrothermaux et encaissées dans des roches de nature diverses : sédimentaires, ignées, métamorphiques et ultramafiques. Les gisements de type «five-element veins» sont exploités pour leur teneur importante en Ag, Bi et Co mais variables d'un gisement à l'autre. Les textures particulières des éléments natifs sous forme dendritique indiquent une cristallisation rapide, loin des processus d'équilibre. Ces gisements sont caractérisés par l'association d'une fracturation et d'un mélange d'hydrocarbure et de fluide riche en métaux, entraînant la précipitation du minerai et la formation des textures particulières et d'assemblages inhabituels d'arséniures de Ni, Co avec de l'Ag et Bi natif (Markl et al., 2016). Cependant, la formation de ce genre de gisement est encore débattue et peu de modèles de formation satisfaisants ont été proposés à ce jour. L'importance du méthane dans la formation du minerai semble être liée à son caractère d'agent réducteur de l'environnement de dépôt (Markl et al., 2016 ; Burisch et al., 2017) (Figure I.1). La précipitation du minerai serait initiée en mélangeant un fluide très réducteur, pauvre en métaux et riche en CH<sub>4</sub> (fluide B et fluide C) avec un fluide fortement salin et riche en métaux (fluide A). Ce modèle est appliqué à une croûte terrestre composée de roches ignées métamorphiques et cristallines recouvertes en discordance par des unités de roches sédimentaires.

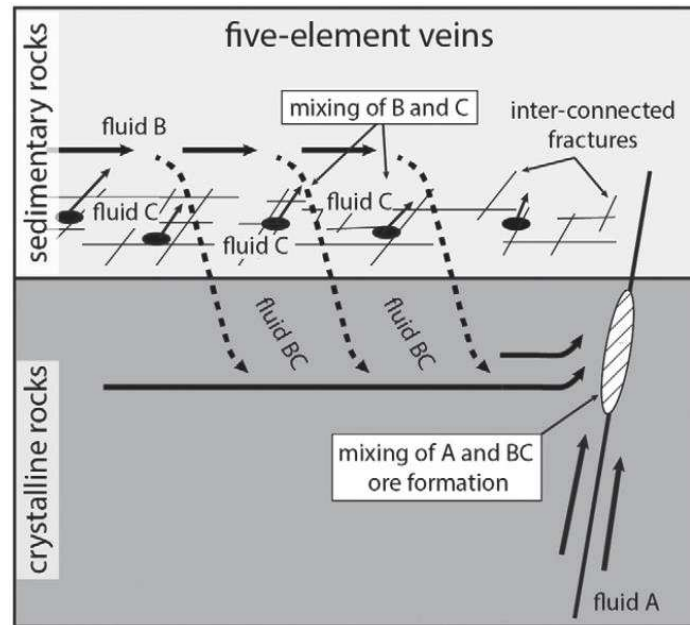


Figure I.1 : Modèle proposé de mélange de fluide réducteur (riche en  $\text{CH}_4$ ) avec des fluides riches en métaux et salins (d'après Burisch et al., 2017)

Kissin (1992) explique également que ce modèle magmato-hydrothermal de circulation de fluides est lié à une tectonique extensive. Bien que tous les gisements définis présentent des environnements de formation différents, des températures et/ou des salinités variées, seules l'association minérale et les textures spécifiques des métaux sont très similaires et permettent de regrouper ces dépôts miniers dans ce gisement de type « five-element veins ». Pour ces raisons, le gisement de Bou Azzer a été considéré comme un gisement de type « five-element veins » par Kissin (1992), Markl et al. (2014) et Burisch et al. (2017).

#### 4. La problématique des serpentinites de l'Anti-Atlas

Il a été proposé que les boutonnières de Bou Azzer et de Siroua soient les traces de la suture de l'orogénèse Panafricaine de l'Anti-Atlas en raison de la présence des serpentinites. La difficulté à obtenir un modèle géodynamique satisfaisant et consensuel peut laisser penser que cette solution n'est pas réaliste, la problématique « géodynamique » est donc sous-jacente à ce travail. Des questions demeurent :

- La boutonnière de Bou Azzer est-elle vraiment la zone de suture principale de l'orogénèse Panafricaine ?
- L'orientation et la taille de la boutonnière de Bou Azzer sont-ils cohérents avec sa position de suture ? En d'autres mots, est-ce que le domaine de Bou Azzer, s'il demeure le site où se passe la subduction et l'obduction, est de taille suffisante pour expliquer l'intégralité du volcanisme de l'Anti-Atlas, même si ce dernier est plus développé dans sa partie Est ?

- Est-ce que le processus d'obduction a vraiment été actif dans l'Anti-Atlas ? Est-il en accord avec l'intensité de la déformation observée dans la boutonnière de Bou Azzer, tout particulièrement ?
- La subduction de l'ophiolite de Bou Azzer est remise en question. L'hypothèse d'une exhumation sur faille normale est-elle en adéquation avec l'environnement géodynamique en domaine transtensif défini par Tuduri et al. (2018a) ?

Une alternative au modèle de l'obduction a été proposée récemment par Caby (2014) à partir de l'analyse tectono-pétrographique des fragments de serpentinites. Il est suggéré que le manteau n'a pas été exhumé par obduction mais en contexte intracontinental extensif, comme ce qui est décrit dans les modèles d'exhumation tectonique du manteau en domaine de Transition Continent-Océan (TOC). Le manteau lithosphérique sous-continentale se retrouve alors exposé sur le plancher océanique en pied de marges passives continentales et non volcaniques. Ce modèle a été démontré et appliqué pour la marge Néoprotérozoïque du Mali et étendu à ce qui pourrait se passer à Bou Azzer (Caby, 2014). L'exhumation de péridotites dans un environnement de marge continentale proximale en début d'océanisation en contexte d'hyper-extension, est de plus en plus reconnue et acceptée dans divers endroits du globe (Figure I.2) (Froitzheim & Manatschal, 1996 ; Marroni et al., 2001 ; Manatschal, 2004 ; Lagabrielle, 2009).

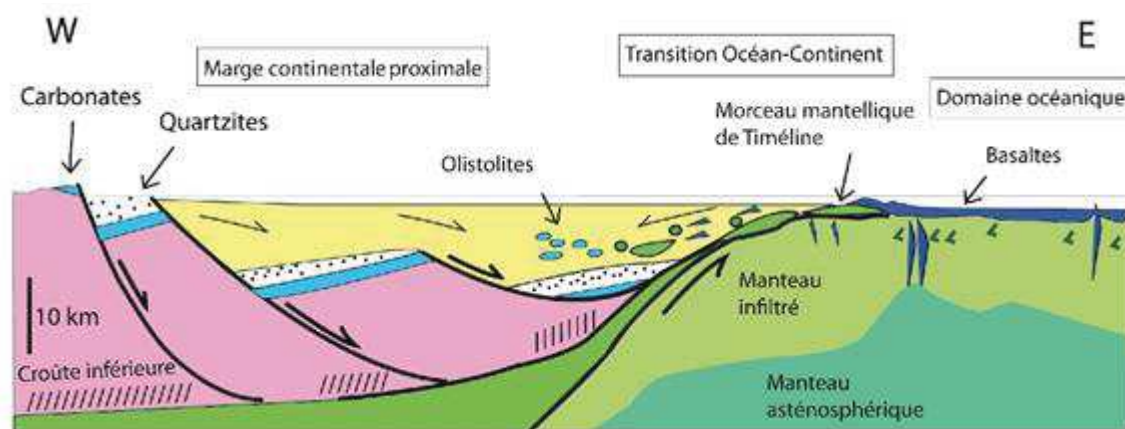


Figure I.2 : Reconstruction schématique pré-800 Ma (sans échelle) de la transition océan-continent au NE du Mali (Caby, 2014)

Grâce à la modélisation analogique, Brun & Beslier (1996) ont essayé d'expliquer la formation des zones de TOC à partir de l'exemple de la marge passive Atlantique. Ils proposent que la formation des marges passives et des bassins sédimentaires associés s'effectue par cisaillement « pur » le long de failles de détachement. A l'aide de méthodes numériques, Whitmarsh et al. (2001) démontrent également que la mise en place du manteau se fait par exhumation sur décrochement à faible pendage au niveau de la marge passive non volcanique de l'Atlantique Nord. D'un point de vue pétro-structural, l'exhumation mantellique se reconnaît par divers indices tectono-sédimentaires (Lagabrielle & Bodinier, 2008 ; Clerc et al., 2012) :

- un contexte extensif le long du détachement à faible pendage (exemple du bassin d'Aulus, Figure I.3A),
- la présence de sédiments produisant d'importants volumes de débris de composition variable à dominante ultramafique (démantèlement de plateforme carbonatée par des processus tectono-sédimentaires) (Lagabrielle & Auzende, 1982) (Figure I.3B).
- la présence d'ophicalcites et de brèches de manteau serpentinisé (Clerc et al., 2012)

Dans les environnements de marges passives, la péridotite a souvent été décrite comme étant très fortement serpentinisée et carbonatée, elle est également appelée « ophicalcite » (Spooner & Fyfe, 1973 ; Bonatti et al., 1974 ; Dietrich et al., 1974 ; Gianelli & Principi, 1977 ; Ohnenstetter, 1979 ; Lemoine, 1980 ; Cortessogno et al., 1981 ; Lagabrielle & Cannat, 1990). Picazo et al. (2012) ont proposé, dans les contextes TOC, que la carbonatation et l'altération en talc sont les derniers événements affectant le manteau serpentinisé lors de sa remontée le long de failles de détachement au niveau des rides océaniques lentes. Ainsi, la combinaison entre une déformation cassante/fragile et des processus d'altération induits par des fluides hydrothermaux pourraient être à l'origine de la formation des ophicalcites.

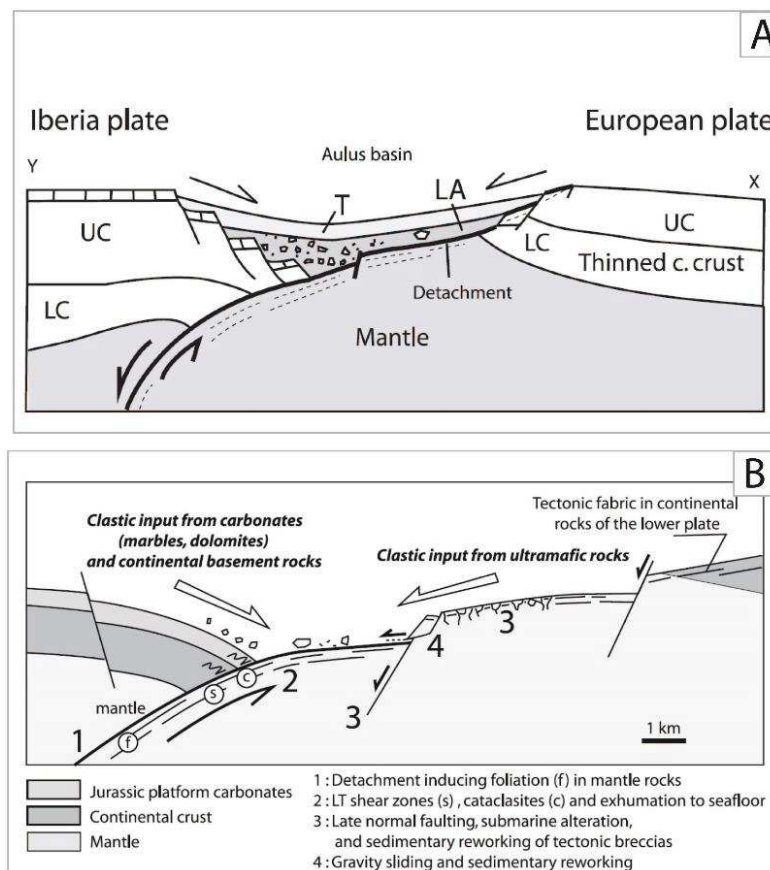


Figure I.3 : Schéma décrivant le mode de mise en place des sédiments de compositions ultramafiques et clastiques associées en contexte d'exhumation le long de détachement à faible pendage A) à l'échelle des plaques, B) à l'échelle de l'affleurement (Lagabrielle & Bodinier, 2008)



---

## 5. Objectifs de la thèse

Cette thèse a pour objectif de comprendre le modèle structural qui contrôle la formation des minéralisations de Bou Azzer, en association avec l'obtention de contraintes géochimiques sur les fluides et les minéralisations arséniées. Trois objectifs :

- 1) *Etablir un modèle pétro-structural précis et complet* du gisement de Bou Azzer basé sur l'étude texturale et minéralogique des minéralisations. Ce travail se fera à l'aide d'une analyse texturale fine des phases minéralogiques (observations allant du terrain aux lames minces), de cartographie minéralogique par l'outil QEMSCAN (Quantitative Evaluation of Minerals by SCANNing electron microscope) de caractérisation minéralogique et texturale en cathodoluminescence et d'analyse géochimique in-situ par microsonde électronique et LA-ICP-MS.
- 2) *Coupler l'étude pétro-structurale à l'analyse géochimique du fluide et des minéralisations* du gisement de Bou Azzer afin d'établir le lien entre texture/déformation/minéralogie et étude spécifique de la chimie et des conditions physico-chimiques des fluides minéralisateurs. Cette étude aura pour objectif d'amener une discussion sur l'origine et la source des fluides minéralisateurs.
- 3) *Intégrer l'ensemble de ces résultats dans un modèle global* afin de discuter du contexte tectonique de la mise en place des minéralisations le long du contact entre les serpentinites, la diorite quartzique et les roches volcaniques précambriennes.

Ce travail pourra également avoir des retombées et des conséquences à la fois sur les campagnes d'exploration et d'exploitation mais aussi sur de nouveaux concepts métallogéniques ; notamment sur la définition des gisements tels que celui de Bou Azzer dont les modèles de formation sont toujours très discutés et controversés. Le cobalt, métal en essor par son utilisation croissante, devient important pour la transition écologique. L'étude de ce gisement unique permettra une nouvelle vision de la mise en place du Co dans de nouveaux environnements de dépôt. L'étude de sa formation dans un contexte particulier nous amène à étendre la réflexion sur de nouveaux modèles de formations des gisements miniers. Cette étude était initialement prévue sur les deux gisements de classe mondiale de l'Anti-Atlas Marocain que sont Imiter et Bou Azzer. Cependant, ce projet de thèse s'est focalisé sur la compréhension du modèle structural qui contrôle les minéralisations de Bou Azzer, au regard du modèle structural d'Igoudrane, gisement particulier exploité dans le district argentifère d'Imiter (participation à une publication en cours de rédaction).

---

## **B. Contexte géodynamique, géologique et métallogénique de l'Anti-Atlas Marocain**

### **1. Localisation et description géodynamique de l'Anti-Atlas Marocain**

L'Anti-Atlas Marocain est une chaîne de montagne orientée ENE-WSW et se trouvant à une altitude moyenne de 1500 mètres d'altitude. Il est bordé au Nord par le Haut-Atlas et la Faille Sud Atlasique (FSA), au Sud par le Craton Ouest Africain (COA) et est séparé en son centre par l'Accident Majeur de l'Anti-Atlas (AMAA) (Figure I.4). L'Anti-Atlas Marocain représente le plus important segment de la ceinture Protérozoïque d'Afrique du Nord et demeure un élément clé pour la géologie du COA (Hefferan et al., 2000 ; Ennih & Liégeois, 2001 ; Ennih & Liegeois, 2003). L'Anti-Atlas Marocain est composé de fenêtres d'érosion laissant affleurer des roches d'âges précambrien appelées « boutonnière ». Le socle d'âge Paléoprotérozoïque ne s'observe que dans les boutonnières situées à l'Ouest de l'AMAA et représentent le rebord septentrional du COA, telles que la boutonnière de Bas Drâa (BD), d'Ifni (If), de Kerdous (K), de Tagragra d'Akka (TA); d'Igherm (Im); Tagragra de Tata (TT), d'Iguerda (Ig), d'Agadir-Melloul (AM) et de Zenaga (Z) (Figure I.4). En revanche, le socle Paléoprotérozoïque est absent dans les boutonnières situées au Nord de l'AMAA comme celles du Siroua, de Bou Azzer, de Sidi Flash, d'Imiter et d'Ougnat (Figure I.4). Dans ces derniers cas, les roches les plus anciennes sont d'âge Néoprotérozoïque (Cryogénien). Tous ces complexes protérozoïques ont été par la suite recouverts par une épaisse couverture sédimentaire attribuée au Paléozoïque inférieur (infracambrien et Cambro-Ordovicien). Plusieurs orogénèses affectent l'Anti-Atlas : l'orogénèse Eburnéenne, Panafricaine, Hercynienne et Alpine. L'orogénèse Eburnéenne est la plus ancienne (Abouchami et al., 1990 ; Liégeois et al., 1991). L'orogénèse Panafricaine apparaît durant le Néoprotérozoïque et se définit par la déformation des roches lors de la fermeture d'un bassin océanique et de l'accrétion de roches d'arc insulaire durant un épisode de compression amenant la subduction du COA sous un continent inconnu. L'orogénèse Hercynienne a lieu lors du Paléozoïque et est caractérisée par la collision entre les continents du Gondwana et de la Laurentia. L'Anti-Atlas Marocain va se structurer au travers de formation de dômes à grande échelle permettant l'affleurement, après érosion, des roches Paléoprotérozoïque et Néoprotérozoïque et de grands plis lors de l'orogénèse varisque et alpine (Choubert, 1945 ; Hindermeyer, 1953a, 1953b ; Leblanc & Lancelot, 1980 ; Thomas et al., 2002 ; Caritg et al. 2004 ; Gasquet et al. 2004; Soulaïmani et al., 2006 ; Youbi et al., 2013 ; Blein et al., 2014 ; Walsh et al., 2012 ; Tuduri et al. 2018b). Nous présenterons uniquement les boutonnières montrant des relations avec les événements tectono-magmatiques subis par l'Anti-Atlas, dont un intérêt particulier sur celle de Bou Azzer.

La diversité des unités géologiques composant les différentes boutonnières de l'Anti-Atlas rend délicate la détermination précise des événements géologiques survenue dans l'Anti-Atlas. Trois courants de pensée se succèdent. Choubert (1963) interprète certaines discordances comme des

coupures majeures dans les cycles orogéniques. Leblanc (1975) décrit la mise en évidence de deux phases de déformation panafricaines appelées B1 et B2 sur la base de l'individualisation d'unités lithostructurales et de données géochronologiques. Tuduri et al. (2018a) décrivent une nouvelle séparation litho-tectonique au travers de différentes lithologies et déformations selon trois évènements tectono-magmatiques associés à des déformations majeures au sein de deux complexes : le complexe inférieur et le complexe supérieur. Le complexe inférieur est décrit par le développement d'un magmatisme potassique calco-alcalin dans des méta-sédiments, sous le contrôle d'un contexte tectonique transpressif (Choubert, 1963a; Barbey, 2004 ; Thomas et al., 2004 ; Gasquet et al., 2005b ; Tuduri, 2005 ; Walsh et al., 2012 ; Tuduri et al., 2018b). Les unités géologiques rattachées au complexe supérieur sont représentées par les dépôts de roches volcano-sédimentaires et magmatiques de composition calco-alcaline à alcaline potassique mises en place dans un contexte tectonique transtensif avant la fermeture d'un bassin par l'orogénèse (Thomas et al., 2004 ; Gasquet et al., 2005a ; Walsh et al., 2012 ; Tuduri et al., 2018a). Tuduri et al. (2018a) ont particulièrement décrit le complexe inférieur dans la boutonnière du Saghro. Le complexe supérieur est particulièrement représenté par le Supergroupe de Ouarzazate et est dominé par la mise en place de tufs au travers de roches ignimbrétiques au sein de structures caldériques et d'intrusions plutoniques, principalement granitiques, qui étaient contemporaines de la déformation transtensive.

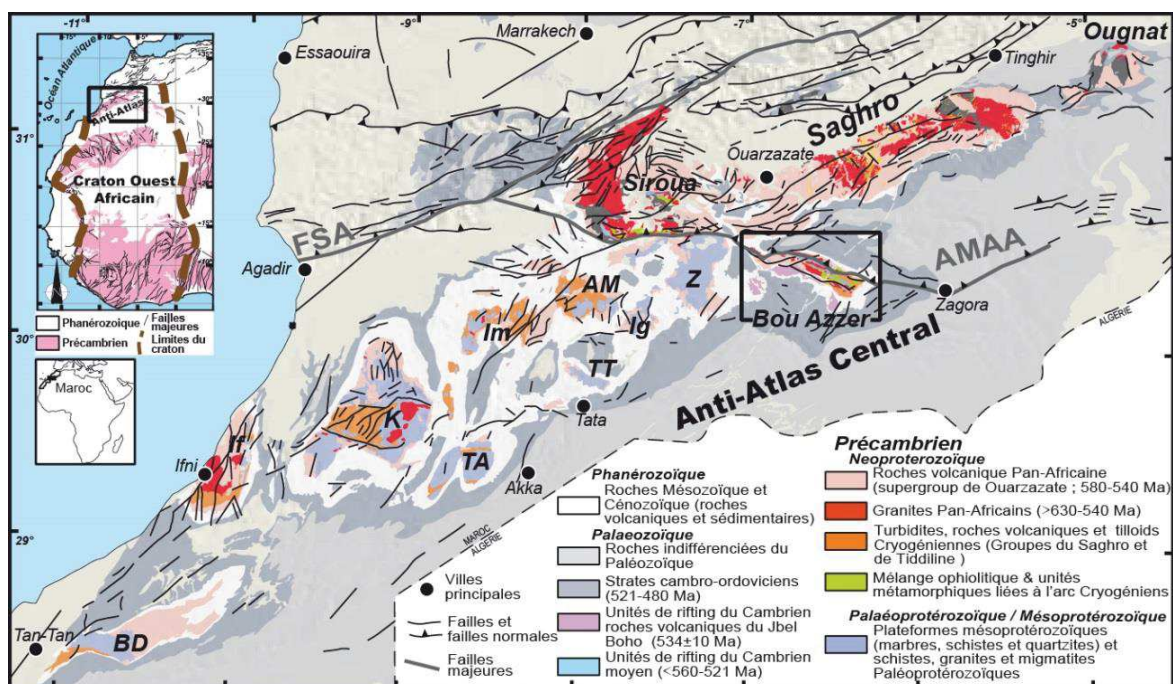


Figure I.4: Carte géologique de l'Anti-Atlas Marocain à l'échelle de l'Afrique et de la Mer Méditerranée (d'après Tuduri et al., 2018). (Noms des boutonnières : AM : Agadir-Melloul ; BD : Bas Drâa ; K : Kerdous ; If : Ifni ; Ig : d'Iguerda ; Im : Igherm ; TA : Tagragra d'Akka ; TT : Tagragra de Tata ; Z : Zenaga)

## 2. Cadre et contexte géologique des boutonnières composant l'Anti-Atlas

### a) Contexte géologique des boutonnières de l'Anti-Atlas occidental

La boutonnière de Bas Drâa est située au Sud-Ouest de l'Anti-Atlas (Figures I.4 et I.5). Le socle méta-sédimentaire de la boutonnière de Bas Drâa est composé de schistes et de grauweekes métamorphisés dans le faciès des schistes verts (Mortaji et al., 2000; Karaoui et al., 2014). Ce socle se retrouve recoupé par des dykes basiques gabbroïques et doléritiques orientés  $\sim N70^{\circ}-120^{\circ}E$ , constituant le socle cristallin de la boutonnière (Ikenne et al., 1997). Ces granitoïdes sont de petites tailles et d'âges Paléoproterozoïque (datés en U-Pb à  $1987 \pm 20$  Ma, Aït Malek et al., 1998). Mortaji et al. (2001) ont identifié trois unités Paléoproterozoïques magmatiques constituant le socle cristallin de la boutonnière (Figure I.5) : i) des diorites, des monzogabbrodiorites et des granodiorites de composition calco-alkaline (le massif de Tamousift) ; ii) des granites et granodiorites porphyriques péralumineux (le granite de Sidi Saïd) et iii) des filons de leucogranites péralumineux.

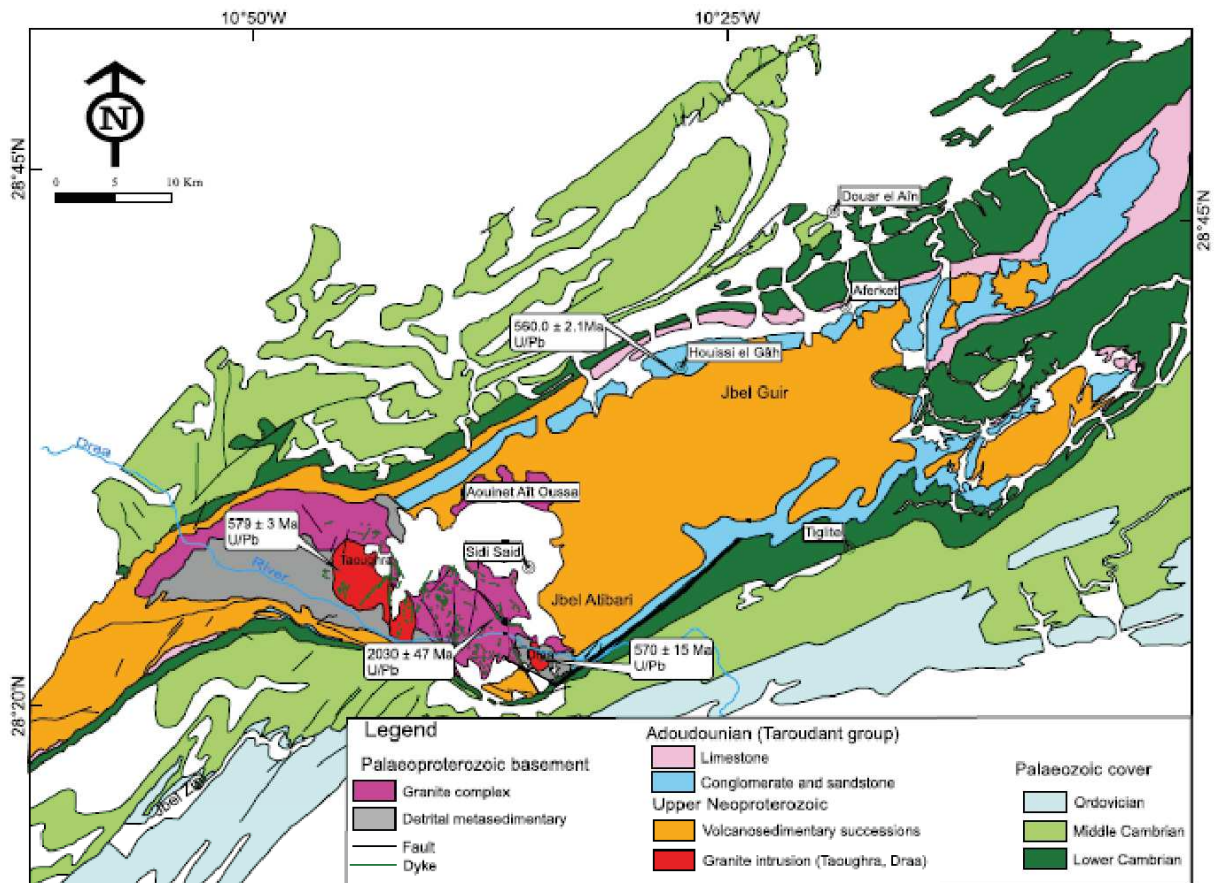


Figure I.5 : Carte géologique simplifiée de la boutonnière de Bas Drâa (d'après Karaoui et al., 2014)

La boutonnière de Kerdous est située au Sud-Ouest de l'Anti-Atlas et de l'AMAA ; et au Sud de la FSA (Figures I.4 et I.6). La boutonnière a subi l'orogénèse Eburnéenne et montre des unités fortement métamorphiques. La boutonnière est composée des unités suivantes : i) une série de quartzites ayant subi un faible métamorphisme (Barbey et al., 2004) ; ii) des schistes Paléoproterozoïque appelés « les Schistes de Kerdous » ou « le groupe de Had-n-Tahala » en couverture sur les quartzites. Ce sont essentiellement des faciès turbiditiques qui ont subi un métamorphisme de faible degré (Barbey et al., 2004). Ils sont datés autour de  $2045 \pm 1.8$  Ma (Barbey et al., 2004) ; iii) des granites datés à  $2044 \pm 2$  Ma par Barbey et al. (2004) et  $2046 \pm 3$  Ma par Gasquet et al. (2001a,b) ; et iv) des filons basiques gabbroïques, similaires aux filons basiques étudiés dans les autres boutonnières, qui recoupent les quartzites (Barbey et al., 2004).

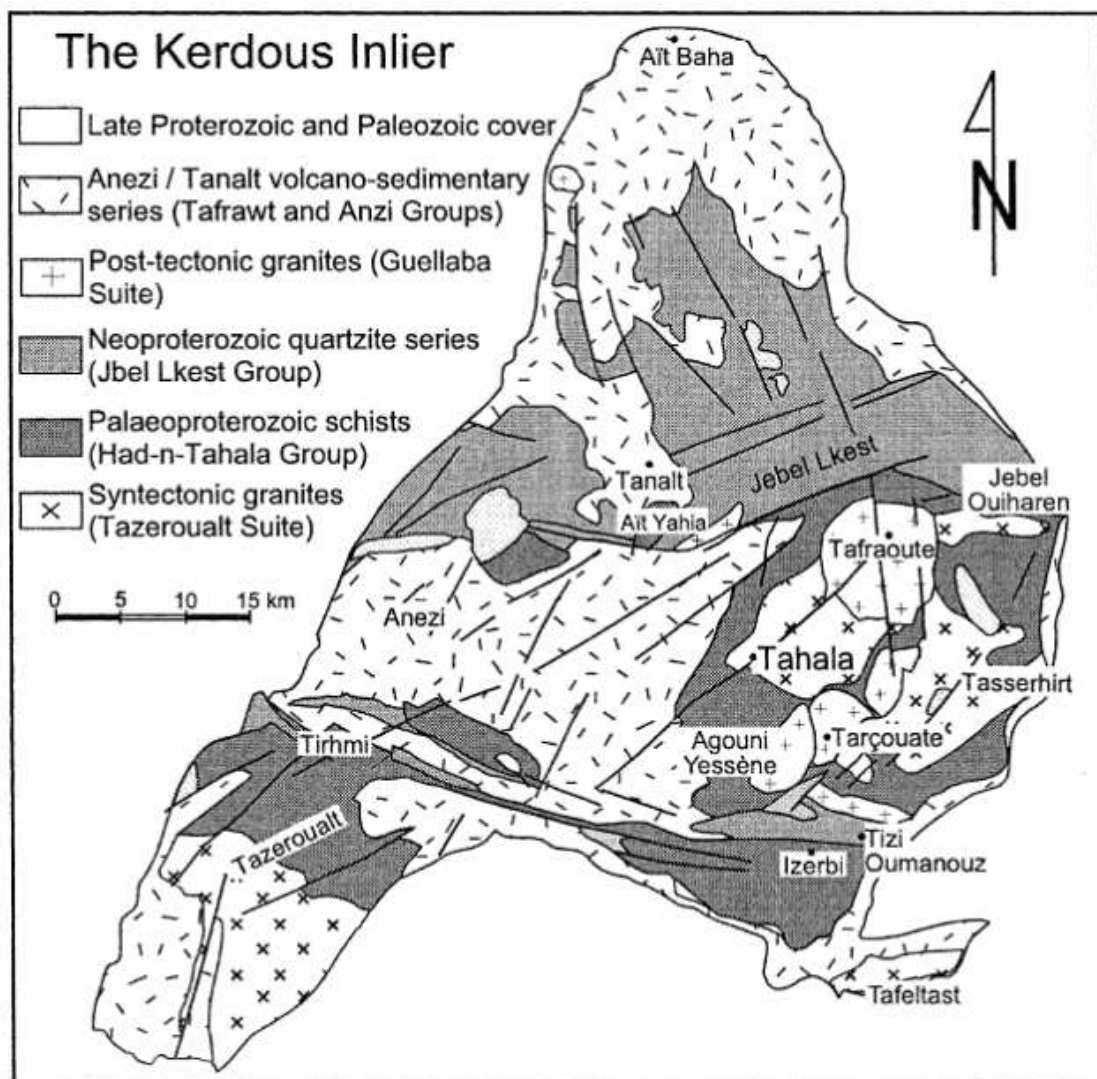


Figure I.6 : Carte géologique simplifiée de la boutonnière de Kerdous (modifiée d'après Choubert, 1963)

La boutonnière de Tagragra d'Akka est située au Sud-Ouest de l'Anti-Atlas et de l'AMAA (Figure I.4). Elle est composée d'unités lithologiques similaires à la boutonnière de Bas Drâa. Le socle méta-sédimentaire de la boutonnière est composé d'une série grésopélique et grauwacke à cinérites (tufs de cendre volcanique) (Ikenne et al., 1997) (Figure I.7). Il est recoupé par des massifs de granitoïdes orientés  $\sim N120^\circ E$ , constituant le socle cristallin de la boutonnière et datés à  $2043 \pm 12$  Ma (Chalot-Prat et al., 2001). Deux unités magmatiques du socle cristallin ont notamment été étudiées par Mortaji et al. (2000) : i) les granitoïdes massifs calco-alcalins (le massif de Tamda-n-Boulmkahel) ; et ii) les granites porphyroïdes péralumineux et les leucogranites à deux micas (le massif d'Oued Bou Zarif). Les filons basiques d'aplite, de pegmatites, orientés  $N70-110^\circ E$  (Figure I.7), ont une affinité tholéiitique et calco-alcaline (Ikenne et al., 1997) et ont été datés à  $1755 \pm 25$  Ma (sur pegmatite - Chalot-Prat et al., 2001). Pour finir, le Supergroupe de Ouarzazate composé de roches volcaniques Néoproterozoïques recouvre ces unités (Gasquet et al., 2004; Youbi et al., 2013) (Figure I.7).

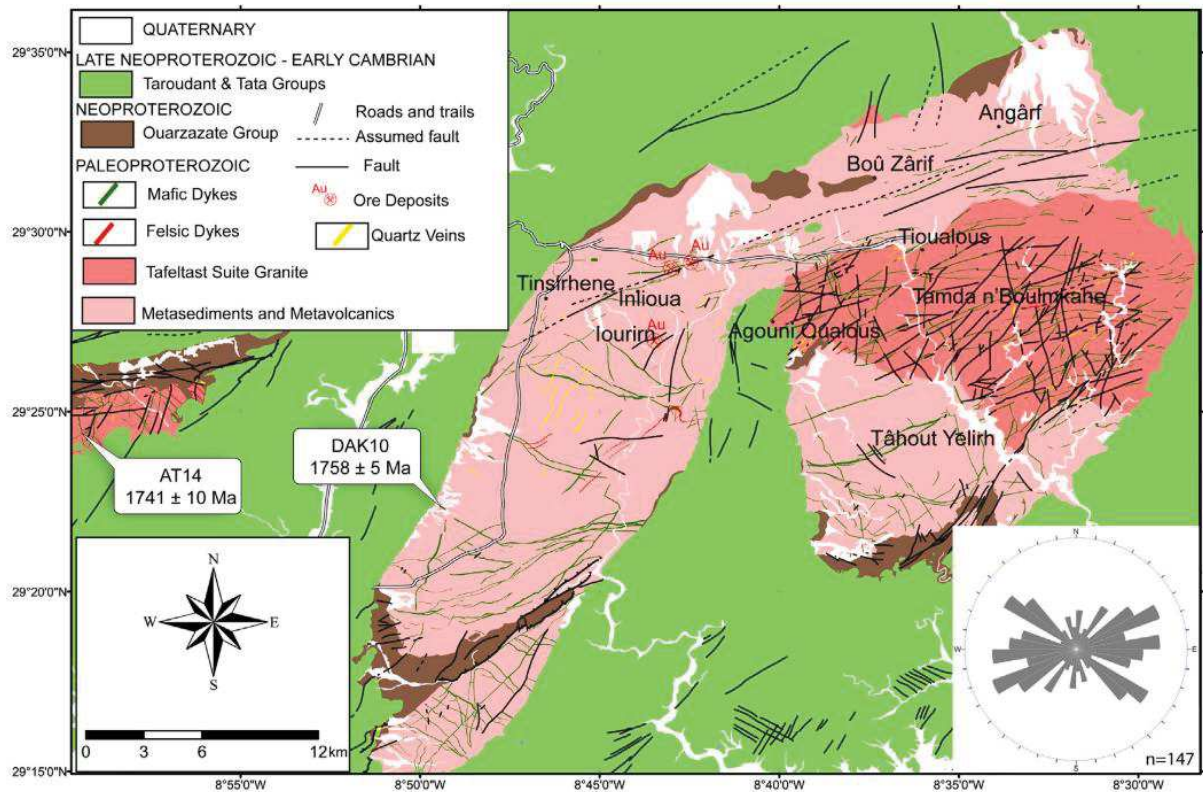


Figure I.7 : Carte géologique simplifiée de la boutonnière de Tagragra d'Akka, montrant également l'orientation des principaux filons basiques (d'après Youbi et al., 2013)

*La boutonnière d'Igherm* est localisée au Sud-Ouest de l'Anti-Atlas Marocain, composée d'un socle méta-sédimentaire à micaschistes et d'un socle cristallin à granites calco-alcalins Paléoprotérozoïques (Figures I.4 et I.8) (Choubert, 1963 ; Choubert & Faure-Muret, 1973 ; Oudra, 1988 ; Hafid, 1992). L'un de ces granites est le granite d'Aït Makhlouf daté à  $2050 \pm 6$  Ma (Aït Malek et al., 1998). Le socle se retrouve recouvert par des séries Néoprotérozoïques de quartzites, molasses et conglomérats (Choubert & Faure-muret, 1973, 1976 ; Hassenforder, 1987) (Figure I.8). Pour finir, le magmatisme basique déjà observé dans les autres boutonnières est représenté par des filons doléritiques et des massifs gabbroïques recoupant le socle méta-sédimentaire Protérozoïque et les formations granitiques du socle cristallin (El Aouli et al., 2001 ; Ikenne et al., 1997). Ces filons et massifs basiques ont également subi le métamorphisme du faciès schistes verts observé dans toutes les boutonnières du Sud-Ouest de l'Anti-Atlas (El Aouli et al., 2001).

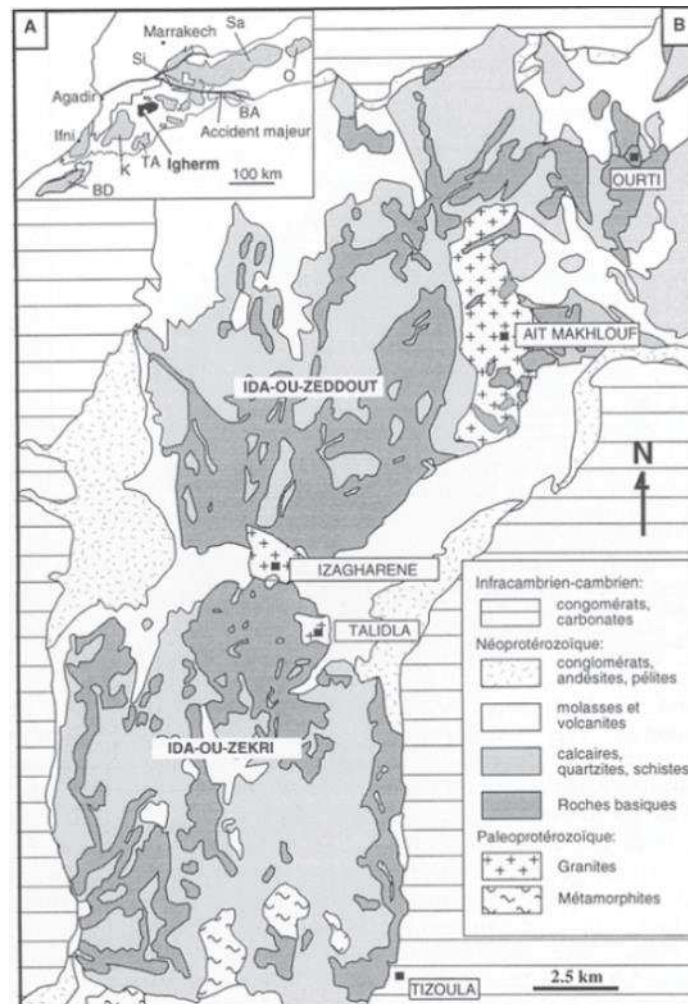


Figure I.8 : Carte géologique simplifiée de a) l'Anti-Atlas et de b) la boutonnière d'Igherm (d'après El Aouli, (2001) et la carte géologique au 1/500 000 de Marrakech)

La boutonnière de Zenaga est située au Sud de l'AMAA, dans le centre de l'Anti-Atlas. Elle est composée de roches métamorphiques, magmatiques et sédimentaires (Ennih & Liegeois, 2008) (Figures I.4 et I.9). Les roches du socle métasédimentaire métamorphisé à l'Eburnéen incluent des gneiss du faciès amphibolite, des migmatites, mais surtout des schistes à biotite (Ennih & Liegeois, 2008). Un âge minimum à 2170 Ma a été obtenu et rattaché à ces schistes par Thomas et al., (2002). Le socle cristallin Paléoprotérozoïque est composé de granodiorite et de granites péralumineux. Ces derniers ont été datés à 2037-2032 Ma par Thomas et al, (2002). Le groupe de Taghdout représente les sédiments de la marge passive qui s'est établie au Nord du COA (Figure I.9). Toutes ces unités se retrouvent par la suite recouvertes par la série Néoprotérozoïque volcanique du Supergroupe de Ouarzazate et du groupe de Tata.

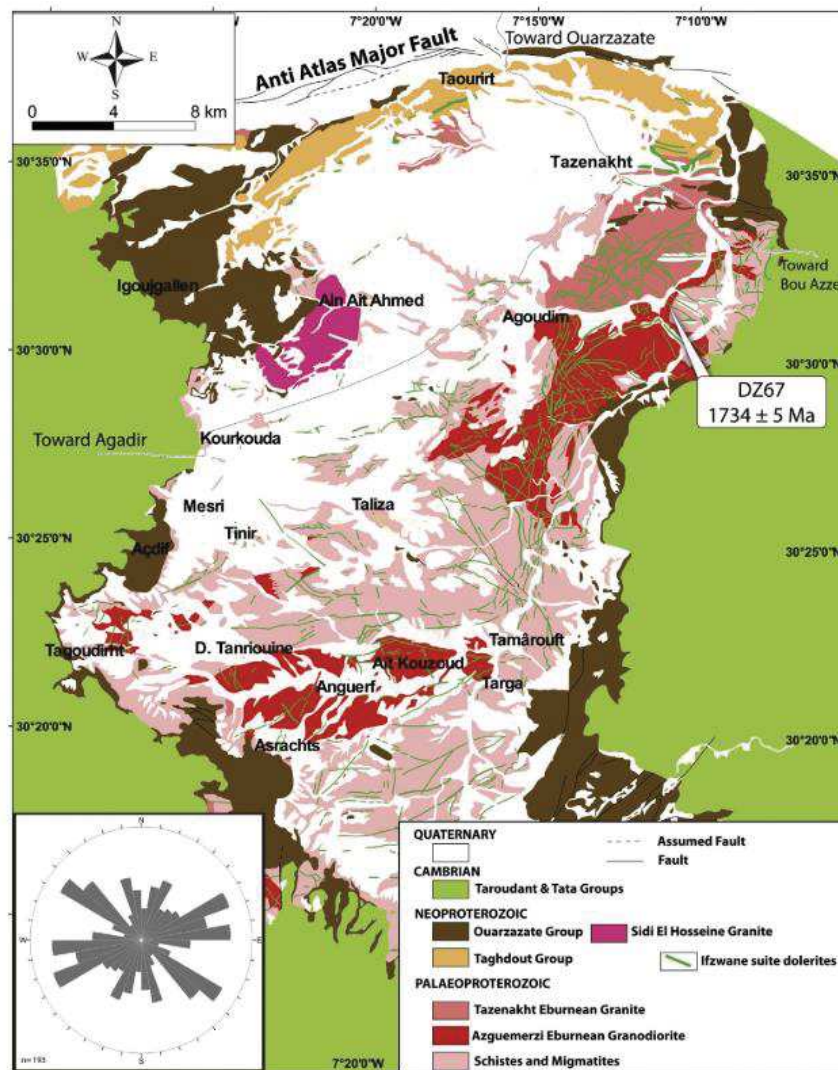


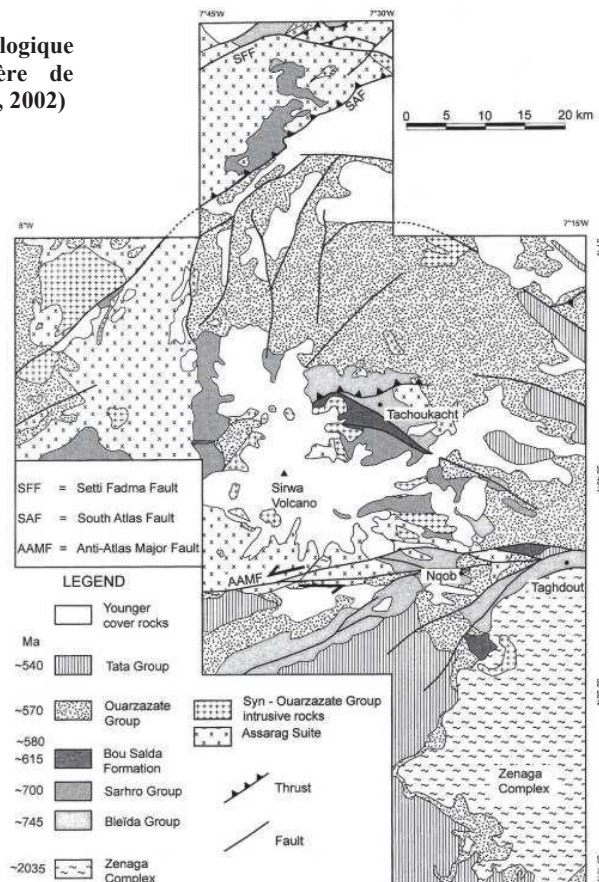
Figure I.9 : Carte géologique simplifiée de la boutonnière de Zenaga (d'après Youbi et al., 2013)



**b) Contexte géologique des boutonnières de l'Anti-Atlas oriental**

La boutonnière de Siroua est située dans l'Anti-Atlas central, au Sud de la Faille Sud Atlasique et traversée par l'AMAA (Figures I.4 et I.10). Cette fenêtre est composée de plusieurs formations sédimentaires, métamorphiques et magmatiques. Le complexe de Zenaga est composé de granitoïdes appartenant au socle cristallin Paléoprotérozoïque et datés à  $2043 \pm 1.8$  Ma (Thomas et al., 2002). La suite d'Ifzwane est constituée de dykes basiques de dolérites recoupant toute la boutonnière et se trouve orienté NNE, NW et EW (Thomas et al., 2002). Le groupe de Saghro est composé de dépôts de bassins volcano-sédimentaires, faiblement métamorphisé et déformé (Choubert, 1963). Le groupe de Bleïda comporte des fragments ophiolitiques tectonisés (l'ophiolite de Nqob et de Tasriwine), orientés E-O, et compris dans le complexe de Khzama (Figure I.10). Ces fragments sont composés d'un complexe filonien formé de gabbros et de diabases qui ont subi une altération à épidosite (Wafik et al., 2001) et de laves basaltiques (Thomas et al., 2002). Clauer (1976) et Samson et al. (2004) proposent des âges à  $788 \pm 10$  Ma et  $762 \pm 1$  Ma, respectivement qui ont été interprétés comme les âges de formation de la croûte océanique. Le lien entre ce complexe ophiolitique et celui de la boutonnière de Bou Azzer – El Graara est encore discuté. Le Supergroupe de Ouarzazate représente plus de la moitié de la surface de la boutonnière. Il est composé d'une séquence volcano-sédimentaire clastique, étudiée et datée à 575-560 Ma par Thomas et al. (2002). Le groupe de Tata (Cambrien) recouvre ensuite les unités lithologiques.

**Figure I.10 : Carte géologique simplifiée de la boutonnière de Siroua (d'après Thomas et al., 2002)**



La boutonnière du Saghro est située à l'est de l'Anti-Atlas Marocain entre la FSA au Nord et l'AMAA au Sud. Le Jbel Saghro représente la plus large province Précambrienne de l'Anti-Atlas, de 130 km de long sur 50 km de large environ. Elle est orientée NE-SO comme l'ensemble des unités de l'Anti-Atlas (Figures I.4 et I.11). Le complexe inférieur est associé à des dépôts de turbidites et des laves mafiques interstratifiées datées à 650 Ma (Gasquet et al., 2008) (Figure I.11). Le complexe inférieur est affecté par une déformation transpressive en réponse à une direction de raccourcissement WNW-ESE (N120°E). Cette déformation se retrouve à l'échelle de la boutonnière qui est affectée par des plis orientés ENE-WSW (Benkirane, 1987 ; Ouguir et al., 1994). Des roches intrusives (diorite, granodiorite, monzogranite) datées à 615 – 575 Ma recoupent ce complexe (Walsh et al., 2012 ; Cheilletz et al., 2002 ; Thomas et al., 2002 ; Blein et al., 2014 ; Inglis, et al., 2005 ; Schiavo et al., 2007 ; Baidada et al., 2017). Les roches du complexe supérieur recouvrent la majorité de la boutonnière du Saghro et sont affectées par un métamorphisme de faible grade. Un épisode de caldera composé d'une association de roches pyroclastiques, de coulées de laves et de volcanites est principalement observé dans le district de Qal'at MGouna (Tuduri, 2005) (Figures I.11 et I.12).

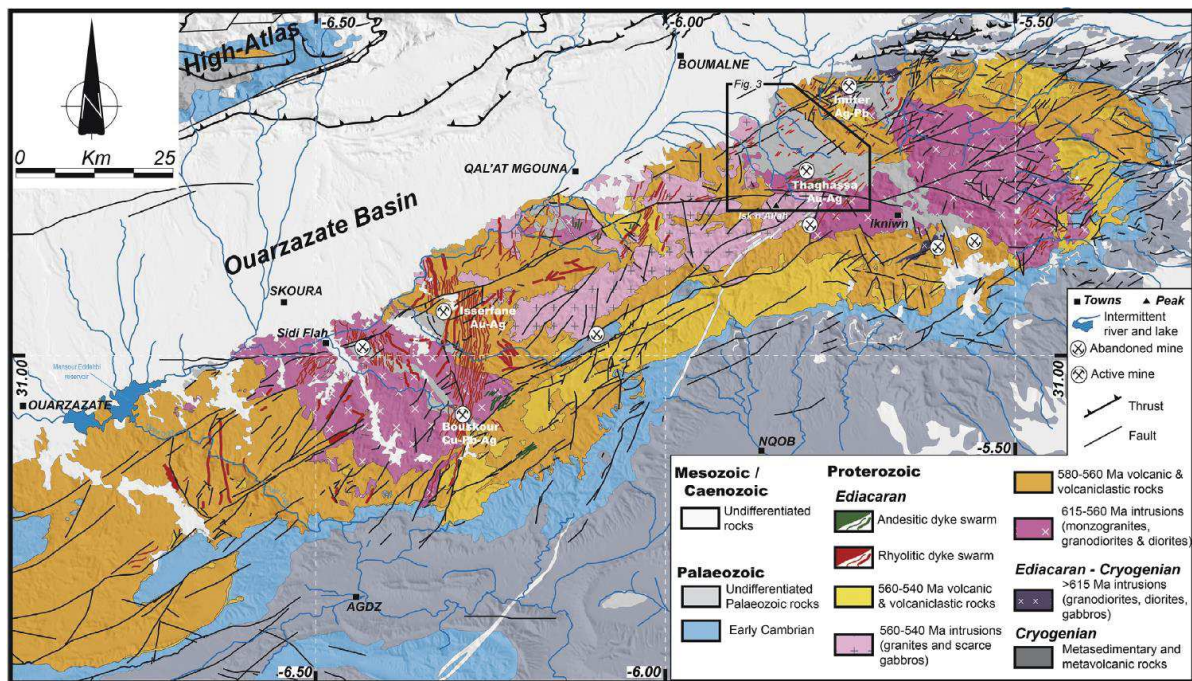


Figure I.11: Carte géologique de la province du Jbel Saghro (Tuduri et al., 2018a)

La boutonnière d'Imiter est localisée à l'extrémité est du Jbel Saghro et abrite le gisement argentifère d'Imiter. La boutonnière d'Imiter est composée de différentes unités géologiques regroupées parmi deux complexes. Le complexe inférieur est essentiellement composé de formations pélitique-gréseuses noires et de grauwackes plissés, ayant subi un faible métamorphisme du faciès des schistes verts/chlorite et datés au Cryogénien (Leblanc & Lancelot, 1980 ; Pasava, 1994 ; Villeneuve & Cornée, 1994). Ce complexe inférieur se trouve ensuite recoupé par la granodiorite de Taouzzak ( $572 \pm 5$  Ma : Levresse, 2001) et la diorite d'Igoudrane ( $677$  Ma ; Schiavo et al., 2007) ;  $565$  Ma : De Wall et al., 2001). Le complexe supérieur est composé de formations volcano-sédimentaires à conglomérats polygéniques à sa base et recouvertes d'une séquence volcanique au sommet datée à  $580-550$  Ma (Pasava, 1994). La séquence volcano-sédimentaire est composée de tufs détritiques, andésitiques, rhyolitiques, d'ignimbrites acides et du dôme rhyolitique de Takhatert, datée à  $550 \pm 3$  Ma par Levresse (2001) (Figure I.12). Un réseau de dykes rhyolitiques et andésitiques, orienté NE-SW à N-S, recoupe les unités des deux complexes. En discordance se trouve la couverture sédimentaire Adoudounienne composée à sa base de stromatolithes, puis surmontée de carbonates et d'une série pélitique-gréseuse.

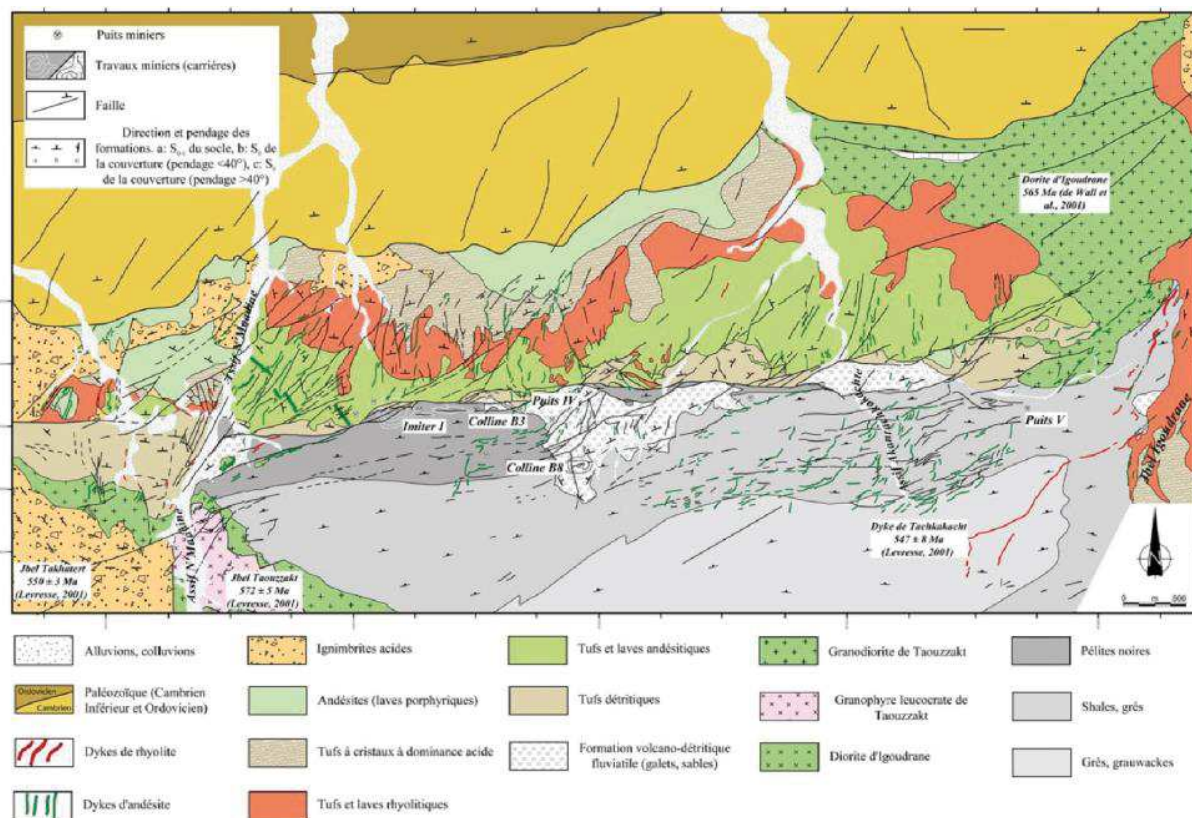


Figure I.12: Log de roches constituant la boutonnière du Saghro (Tuduri, communication personnelle)

### c) *La boutonnière de Bou Azzer–El Graara*

*La boutonnière de Bou Azzer-El Graara* se situe dans la partie centrale de l'Anti-Atlas Marocain, à 45 km au Sud de Ouarzazate (Figure I.4). Elle est divisée en huit unités lithologiques ayant subies un métamorphisme du faciès schistes verts lié à une phase de déformation datée à 685 Ma (Clauer, 1976 ; Bodinier et al., 1984 ; Thomas et al. 2002) (Figure I.13). Par souci de clarté, les unités seront présentées de la plus ancienne à la plus récente en prenant en compte la séparation lithologique proposée par Tuduri et al. (2018a) (Figure I.13).

1. Les roches les plus anciennes sont les gneiss ocellés, les amphibolites, les métasédiments et les métagabbros qui forment le socle gneissique. La carte de la Figure I.13 montre que ces roches sont distribuées selon deux bandes parallèles à l'allongement de la boutonnière, une au NW et une au SE (Bodinier et al., 1984 ; Blein et al., 2013 ; Triantafyllou, 2016, Triantafyllou et al., 2016, 2018). Les unités du Nord formaient un groupe plutôt mal connu et carté comme un arc magmatique mais dont la signification était moins connue. Leblanc (1975) interprétait ces unités comme appartenant à un ensemble effusif de kéraatophyres (« roches correspondant à des rhyolites, dacites et trachytes albitophyriques ») associé au complexe ophiolitique de Bou Azzer et les unités du Sud comme des gneiss polymétamorphiques. Ces deux bandes forment les groupes de Tichibanine-Ben Lgrad au NE et celui de Bougmane au SE.
  - Le groupe de Tichibanine-Ben Lgrad (760 Ma) est constitué de basaltes, de microgabbros, de rhyolites, de tufs acides et dacitiques. La lave rhyolitique a livré un âge de  $767 \pm 7$  Ma et les tufs dacitiques, un âge de  $761 \pm 7$  Ma (Admou et al., 2013 ; Blein et al., 2014). Les protolites de ces roches montrent des affinités magmatiques allant des basaltes de type arrière-arc à des roches volcaniques mises en place lors d'une zone de subduction (Bodinier et al., 1984 ; Saquaque et al., 1989 ; Naidoo et al., 1991b ; El Hadi et al., 2010).
  - Le groupe qui se situe au SE est le complexe de Bougmane (750-700 Ma). Ce complexe est composé d'orthogneiss gabbroïques, granodioritiques et granitiques (Leblanc, 1975 ; Triantafyllou et al., 2018). Ces roches d'affinité d'arc volcanique ont été datées à  $745 \pm 5$  Ma et  $755 \pm 9$  Ma (Admou et al., 2013 ; Blein et al., 2014) et ont fait l'objet de travaux récents sur leur évolution pétrologique et géochimique (Triantafyllou, 2016 ; Triantafyllou et al., 2018). Le complexe de Bougmane retrace la croissance d'un environnement d'arc intra-océanique formé pendant le Cryogénien. Son activité magmatique s'étend sur 120 Ma à travers trois épisodes magmatiques (760-640 Ma) qui ont été entrecoupés d'un « épisode tectonique transpressif », il y a 730–700 Ma (Thomas et al., 2004 ; Gasquet et al., 2005b ; Walsh et al., 2012 ; Triantafyllou et al., 2018 ; Tuduri et al., 2018b).

2. Les observations effectuées par Bodinier et al. (1984) et Blein et al. (2014) dans le groupe de Tichibanine-Ben Lgrad, permettent d'envisager l'existence d'un arc insulaire magmatique et intra-océanique vers 760-770 Ma. Cette interprétation a également été proposée dans les travaux de Triantafyllou et al. (2018) mais surtout pour les unités du SW. Des âges entre  $761 \pm 2$  Ma et  $762 \pm 2$  Ma obtenus par Samson et al. (2004) dans des plagiogranites du complexe ultramafique de Tasriwine de la boutonnière du Siroua sont identiques à ceux obtenus dans l'arc de Tichibanine. Ainsi, les événements magmatiques du complexe de Tasriwine dans la boutonnière de Siroua et ceux de l'arc de Tichibanine à Bou Azzer ont été définis comme contemporains, spatialement associés, et se seraient développés en marge du Craton Ouest Africain (Blein et al., 2014).
3. Sans contraintes sur la position stratigraphique ou tectonique, les roches du complexe ultramafiques de Bou Azzer sont ensuite mises en place. Le groupe de Bou Azzer (Cryogénien supérieur) est un complexe ultramafique fortement serpentinisé interprété comme une ophiolite démembrée et incomplète représentant les reliques de la suture océanique de l'orogénèse Panafricaine (Leblanc, 1981, 1975). L'ophiolite a été datée à  $658 \pm 8$  Ma (Blein et al., 2014) grâce à des zircons appartenant à un dyke de granodiorite associé au gabbro du complexe ultramafique de Bou Azzer. Elle sera présentée en détail dans le chapitre suivant. Le groupe de Bou Azzer comporte également les diorites quartziques systématiquement en contact avec les serpentinites. Bodinier et al. (1984) ont analysé les diorites quartzique de Bou Azzer et montrent qu'elles ont une affinité calco-alkaline.
4. Le groupe de Tachdamt–Bleida est composé de quartzites et de stromatolithes carbonatés recouverts par des laves mafiques et de roches volcano-sédimentaires. Ces roches sont des dépôts de plateforme d'une ancienne marge passive (quartzites, stromatolithes, pélites noires) d'âge Tonien - Cryogénien (Bouougri & Saquaque, 2004 ; Hefferan et al., 2002 ; Leblanc & Moussine-Pouchkine, 1994 ; Saquaque et al., 1989).
5. La suite de Bleïda ( $586 \pm 15$  Ma) représente un plutonisme de collision par la mise en place d'intrusions granodioritiques et dioritiques (Blein et al., 2014) datées entre  $640.8 \pm 1.4$  Ma et  $653.8 \pm 1.6$  Ma (Inglis et al., 2005). La suite d'Ousdrat est composée de granitoïdes allongés parallèlement à la boutonnière et recouverte ensuite par les séries volcano-sédimentaires du groupe Tachdamt–Bleida. Ces granitoïdes se sont mis en place pendant l'orogénèse Panafricaine il y a  $640 \pm 1.5$  Ma (Saquaque et al., 1989 ; Inglis et al., 2003). Ces unités sont recouvertes en discordance par le groupe de Tiddiline il y a  $606 \pm 4$  Ma (Blein et al., 2014). Ce groupe est composé d'une succession sédimentaire clastique et d'ignimbrites déposées dans des bassins syn-orogénique (Leblanc, 1975 ; Hefferan et al., 1992). Cette série sédimentaire marque l'érosion de bassins d'avant arc formés pendant la collision entre l'arc

volcanique Protérozoïque au Nord et le COA au Sud (Blein et al., 2014). Ce groupe pourrait représenter le complexe inférieur redéfini par Tuduri et al. (2018a).

6. Le complexe supérieur est défini par la séquence volcano-clastique de l'Ediacarien supérieur du Supergroupe de Ouarzazate (580-534 Ma) (Leblanc, 1981a ; Blein et al., 2014). Cette séquence couvre en discordance toutes les unités de la boutonnière (Thomas et al., 2004 ; Gasquet et al. 2005).
7. La formation d'Ambed a été caractérisée par Routhier et al. (1970) comme des encroûtements silicifiés et carbonatés déposés au contact entre les roches ultramafiques de l'ophiolite de Bou Azzer et la diorite quartzique. Leblanc (1975) les définit comme l'équivalent des minéralisations en profondeur formé par le processus altération météorique du contact entre la serpentinite et les roches plutoniques.
8. Pour finir, au Paléozoïque inférieur (infracambrien et Cambro-Ordovicien), les unités géologiques sont recouvertes, en discordance, par une épaisse couverture sédimentaire, appelée formation de l'Adoudounien (Gasquet et al., 2005 ; D'Lemos et al., 2006). La présence de séries clastiques datées au Dévonien tardif pourrait indiquer la fin d'un régime transgressif passif et le début du soulèvement central de l'Anti-Atlas (Hassenforder, 1987). Enfin, un dyke doléritique daté au Jurassique ( $160 \pm 10$  Ma) recoupe toute la boutonnière de Bou Azzer (Leblanc, 1975).

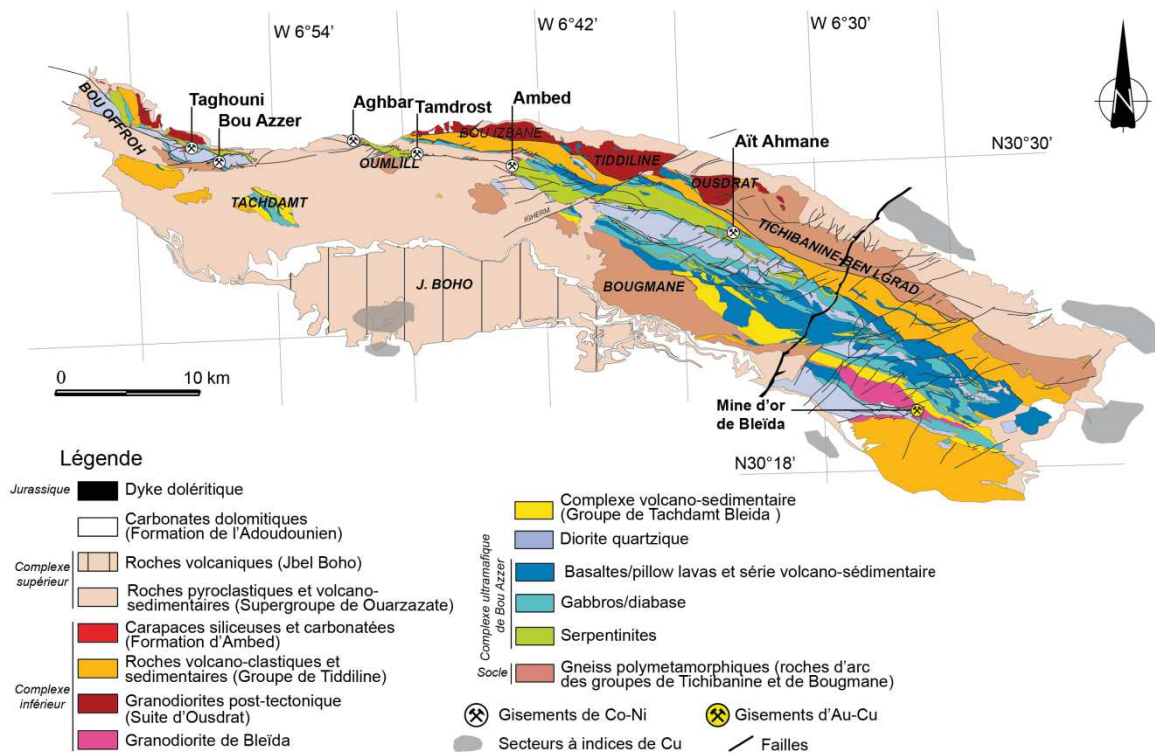


Figure I.13 : Carte géologique de la boutonnière de Bou Azzer – El Graara (modifiée d'après Leblanc (1975), Admou et al. (2013) et Blein et al. (2013))

*Le complexe mafique et ultramafique de Bou Azzer* est ici décrit en détail parce qu'il est en relation directe avec les minéralisations Co/Ni de Bou Azzer. Il est situé dans la partie centrale de la boutonnière de Bou Azzer – El Graara (Leblanc, 1972, 1975, 1976, 1981 ; Bodinier et al., 1984) (Figure I.14). L'unité supposée ophiolitique de Bou Azzer représenterait la zone de suture de l'orogénèse panafricaine (Leblanc, 1975 ; Clauer, 1976). Ce complexe se trouve fragmenté et incomplet mais présente toutes les unités géologiques nécessaires à la définition d'une ophiolite (Miyashiro, 1973) : des péridotites serpentinisées, des gabbros rubanés et massifs, un complexe de dykes basaltiques, des basaltes en coussins recoupés par des sills doléritiques et une série volcano-sédimentaire de couverture (grauwackes, tufs, calcaires, jaspilites) (Leblanc, 1975, 1981 ; Church, 1980) (Figure I.14). Leblanc (1981) a estimé l'obduction de l'ophiolite de Bou Azzer à 686 Ma. Cet âge coïncide avec celui de El Hadi et al. (2010) qui est de  $697 \pm 8$  Ma. Le manteau original, avant serpentinitisation, est supposé être composé d'harzburgites et de lentilles de dunites. Ce manteau a subi une serpentinitisation (Leblanc, 1975) et l'essentiel des serpentinites est de la lizardite mélangée à du chrysotile (Bhilisse et al., 2014). Ces serpentinites ont subi une altération, amenant la formation de la listwénite, produit de l'altération précoce des serpentinites en carbonates (Maacha et al., 2012). Bousquet et al. (2016) ont étudié les contraintes tectono-métamorphiques, structurales et géochronologiques de l'ophiolite de Bou Azzer. Les roches montrent des assemblages de minéraux (Na-amphiboles) typique du faciès des schistes verts pour des conditions de métamorphisme à 5-6 kbar et 500-550°C (Bousquet et al., 2008). Ce métamorphisme serait lié, d'après les auteurs, au processus d'obduction de l'ophiolite. Les dépôts les plus importants du district de Bou Azzer (cf Chap. II) sont systématiquement en lien avec les roches du complexe ultramafique. Les gabbros montrent une affinité tholéiitique et les roches de la séquence volcano-sédimentaire présentent une affinité calco-alcaline (Bodinier et al. 1984).

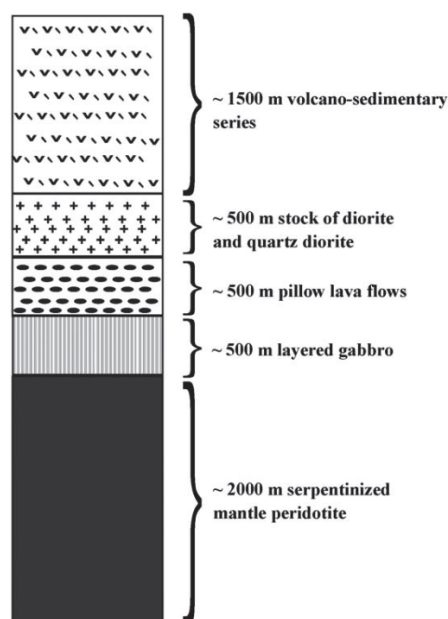


Figure I.14 : Colonne lithologique de l'ophiolite de Bou Azzer (d'après Leblanc, 1981)

### 3. Contexte géodynamique de l'Anti-Atlas

Cette partie décrit les différentes orogénèses affectant l'Anti-Atlas Marocain (Leblanc, 1975 ; Thomas et al. 2002 ; Walsh et al., 2012 ; Blein et al. 2013, 2014 ; Triantafyllou et al., 2016). Seuls deux modèles sont proposés pour faciliter la compréhension du contexte géodynamique de l'Anti-Atlas (Figure I.15 et I.16).

**Orogénèse éburnéenne (2.2 Ga – 800 Ma).** Cette orogénèse s'est déroulée durant le Paléoproterozoïque et est mise en évidence dans les boutonnières de Kerdous, de Zenaga et de Bas Drâa, situées uniquement au Sud de l'AMAA. L'orogénèse Eburnéenne est mise en évidence par le socle méta-sédimentaire composé de schistes et gneiss Eburnéens datés à 2200 à 1735 Ma (Choubert, 1963 ; Charlot, 1976, 1978 ; Mrini, 1993 ; Aït Malek, 1997 ; Barbey et al., 2004 ; Thomas et al. 2004) et recoupé par des intrusions de granitoïdes et de granites péralumineux. Une dynamique cassante a ensuite permis l'injection de dykes basiques affectant les boutonnières (Ennih et al., 2001). La fin de cette orogénèse est visible par le rifting entre le COA et un continent inconnu entraînant la formation d'une marge passive décrite par Ennih & Liégeois (2001), survenue il y a environ 1000-800 Ma selon Walsh et al. (2012) ou bien 700–800 Ma selon Thomas et al. (2002).

**Orogénèse panafricaine (800 - 550Ma).** Une période de raccourcissement amène la fermeture d'un bassin océanique, la subduction du COA vers le Nord et la formation d'un arc volcanique. La déformation des roches des boutonnières de l'Anti-Atlas s'est produite lors de l'orogénèse Panafricaine. Cette convergence permet d'accréter les roches d'arcs insulaires Néoproterozoïques et entraîne l'obduction des roches de la croûte océanique retrouvées dans les boutonnières de Bou Azzer et du Siroua (respectivement, Leblanc, 1975 ; Wafik et al., 2001 ; Thomas et al., 2002b). Cependant, de nombreux auteurs expriment un désaccord quant à l'histoire géodynamique de l'Anti-Atlas durant cette orogénèse. Plusieurs interprétations géodynamiques ont été proposées et discutées. Les discussions portent essentiellement sur la période de raccourcissement, le nombre de subduction ou encore leur pendage (Gasquet et al., 2005 ; Bousquet et al., 2008 ; El Hadi et al., 2010 ; Walsh et al., 2012 ; Blein et al., 2014 ; Triantafyllou et al., 2016). Aucun consensus n'a été obtenu jusqu'à présent. La subduction serait survenue il y a environ 750-700 Ma selon les différents modèles géodynamiques proposés (continent : Cadomia, Walsh et al. 2012). La vergence de la subduction vers le Nord fait consensus, par contre la position de la zone de suture reste discutée. Certains auteurs exposent que l'AMAA représente la suture océanique Néoproterozoïque d'une subduction à vergence Sud (Leblanc, 1975 ; Gasquet et al., 2008) (Figures I.12 et I.13), d'autres à vergence Nord (Saquaque et al., 1989 ; Naidoo et al., 1991a ; Hefferan et al., 2002 ; Soulaïmani & Burkhard, 2006 ; Blein et al., 2014) (Figure I.15). Walsh et al. (2012) concluent que l'AMAA représente la suture océanique de la subduction à vergence Nord durant les stades tectoniques du Panafricain. Un renversement de polarité de la subduction vers le Sud serait survenu à 615-560 Ma (Figures I.12 et I.13). Ennih & Liégeois (2001)



émettent une autre hypothèse quant à la géodynamique liée de l'Anti-Atlas. L'ophiolite de Bou Azzer représenterait bien le témoin d'une croûte océanique obductée pendant la collision entre le COA avec des arcs Néoprotérozoïques volcaniques. La suture serait la FSA. L'AMAA représenterait la frontière Nord d'un aulacogène intracratonique (Ennih & Liégeois, 2001) (Figure I.16). Les roches de l'arc insulaire seraient identifiées dans la boutonnière de Bou Azzer – El Graara (Groupe de Tichibanine-Lgrad et de Bougmane) et dans le Saghro (Massifs de Igoudrane et de Taouzzakt de la boutonnière d'Imiter) entre 760 et 700 Ma et représentées par les roches d'arc (Bodinier et al., 1984 ; Saquaque et al., 1989 ; Thomas et al., 2002, 2004 ; D'Lemos et al., 2006 ; Gasquet et al., 2008 ; El Hadi et al., 2010 ; Blein et al., 2013 ; Triantafyllou et al., 2018). Des roches représentant l'arc insulaire synchrone de la subduction ont été datées à 743 Ma (Thomas et al. 2002) et définies par Bouougri & Saquaque (2004) comme étant des schistes du groupe de Tachoukacht de la boutonnière du Siroua. La collision du COA avec un fragment de croûte continentale encore inconnu induit l'accrétion de roches d'arc volcanique Néoprotérozoïques et l'obduction des complexes ophiolitique dans les boutonnières de Bou Azzer et du Siroua et des roches de l'arc insulaire. Ce fragment de croûte océanique a été daté par Leblanc (1981) à 689 Ma et par El Hadi et al. (2010) à  $697 \pm 8$  Ma. L'accrétion se situerait aux environs de 665 Ma (Gasquet et al., 2008). La fin de l'Ediacarien (580-550Ma) montre la fin de la collision entre le COA et les arcs volcaniques. Cette période post-collisionnelle est accompagnée d'un régime extensif permettant le dépôt de molasse dans un bassin, représenté par la formation de Tiddiline à Bou Azzer et de Dadès dans le Saghro et d'une importante activité magmatique calco-alcaline et rhyolitique comme par exemple la rhyolite de Takhatert dans la boutonnière d'Imiter datée à environ 550 Ma (Cheilletz et al. 2002 ; Gasquet et al. 2005 ; Walsh et al., 2012 ; Thomas et al., 2002).

**Orogénèse varisque.** La transition Protérozoïque/Cambrienne est marquée par le développement d'un bassin d'avant-pays représenté par le groupe de Tata daté à environ 544 Ma (Margaritz et al, 1991 ; Gasquet et al. 2005 ; Thomas et al., 2004). Toutefois, l'orogénèse varisque est supposée affecter la boutonnière de Bou Azzer – El Graara sans que les effets soient reconnus. Des plis anticlinaux d'orientation Nord-Ouest/Sud-Est formés durant cette orogénèse façonnent l'Anti-Atlas en mettant à la surface les roches du Protérozoïque et Néoprotérozoïque (Choubert, 1947 ; Soulaïmani & Burkhard, 2008). Cependant, les déformations hercyniennes dans l'Anti-Atlas restent peu contraintes. Les modèles proposés par Thomas et al. (2002) et Walsh et al. (2012) résument le consensus scientifique sur le contexte géodynamique de l'Anti-Atlas (Figures I.15 et I.16).

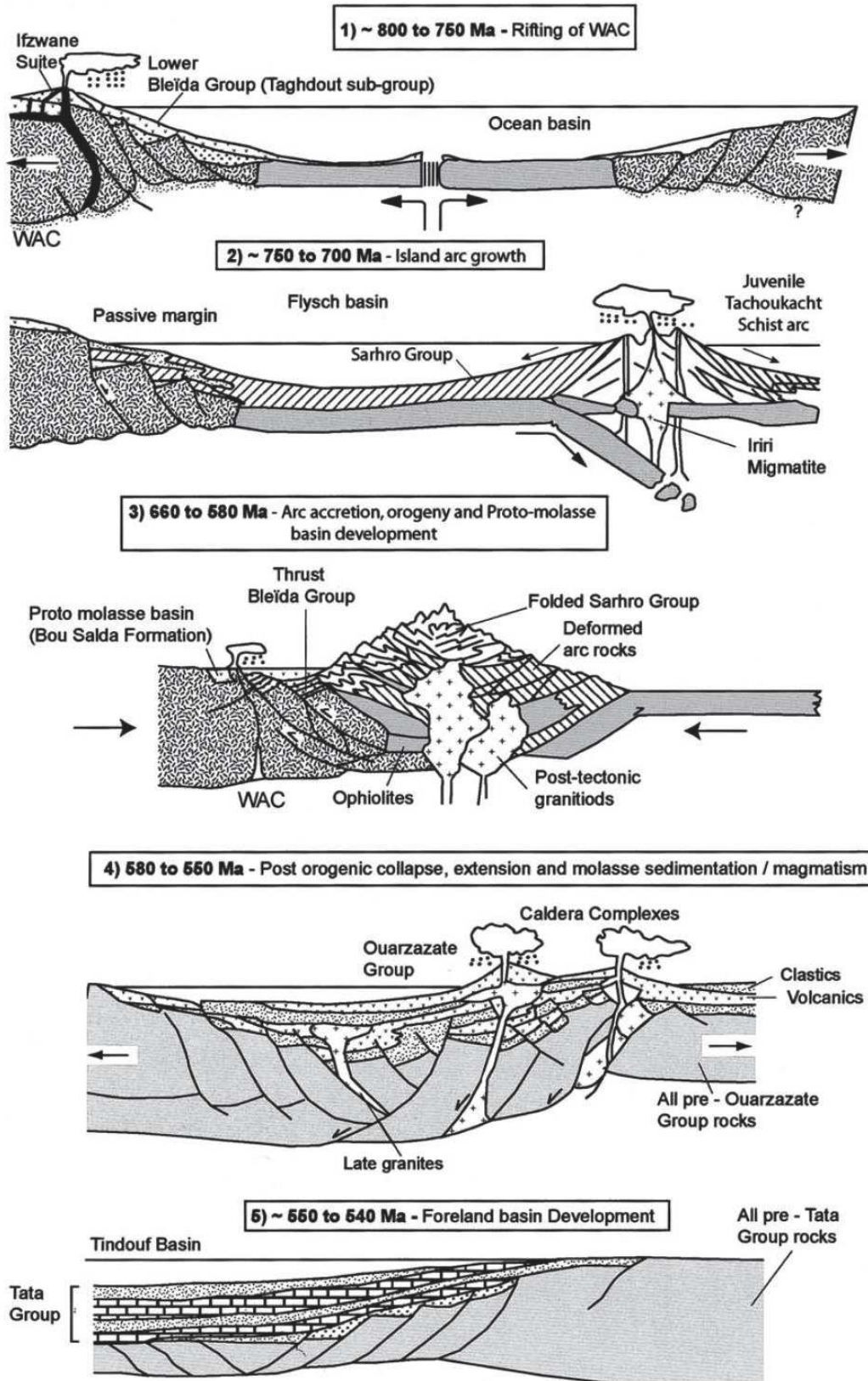


Figure I.15 : Modèle synthétique du contexte géodynamique au niveau de la Boutonnière de Siroua proposé par Thomas et al. (2002)

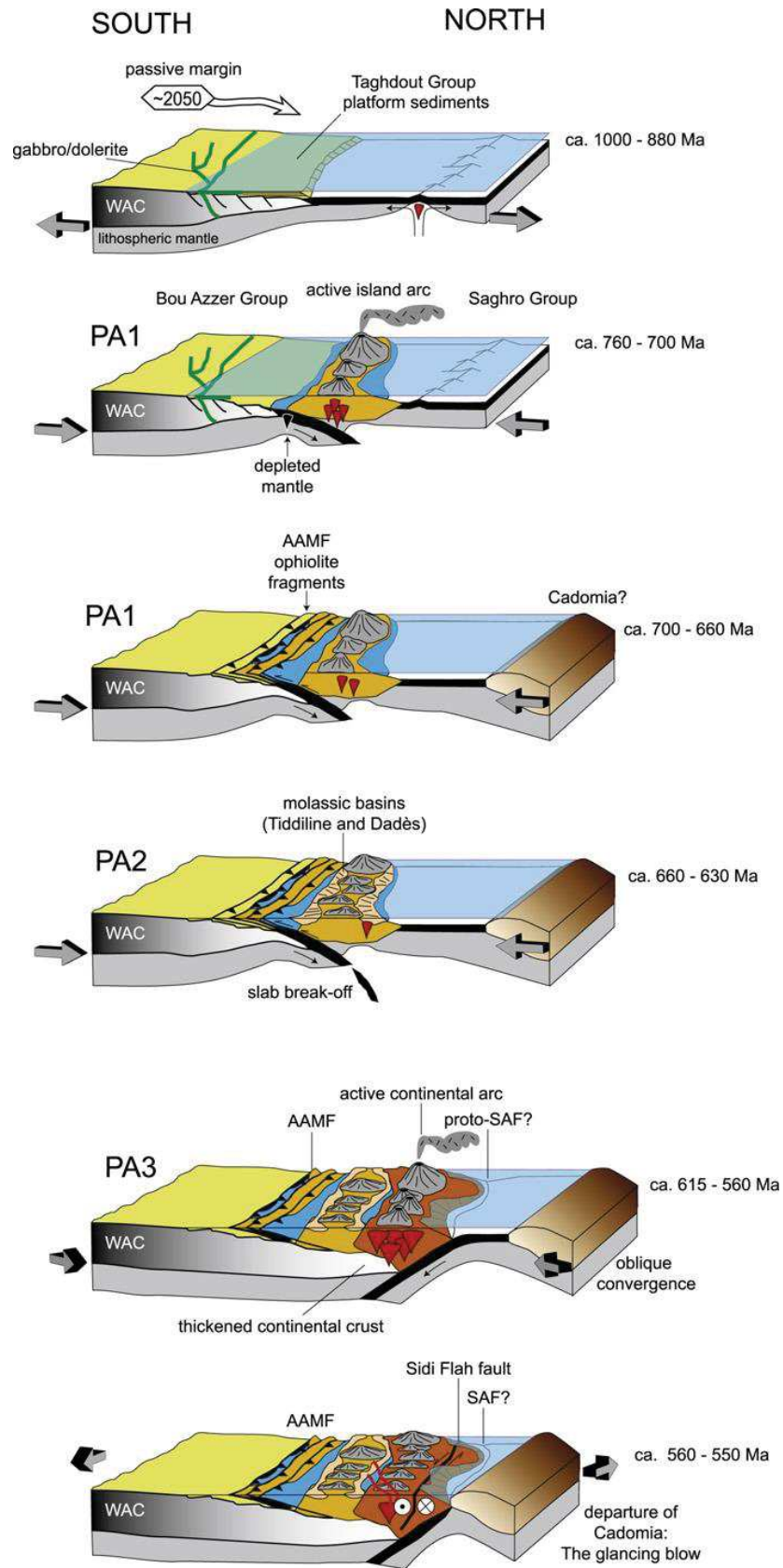


Figure I.16 : Modèle schématique de l'évolution géodynamique de l'Anti-Atlas proposé par Walsh et al. (2012) (modifiée d'après Benziane, 2007)

#### 4. Métallogénie des boutonnières de l'Anti-Atlas

##### a) A l'échelle des boutonnières de l'Anti-Atlas

L'Anti-Atlas Marocain est caractérisé par plusieurs gisements de métaux précieux et de métaux de base tels que les gisements de Bou Madine (Cu-Pb-Zn-Au-Ag) d'Imiter (Ag-Hg), de Bou Azzer (Co-Ni-As-Ag-Au), de Zgounder (Ag-Hg) ou d'Iourim (Au) (Figure I.17), considérés comme Néoprotérozoïques en raison de leur présence au cœur des boutonnières (Petruck, 1975 ; Essarraï et al., 1997 ; Levresse, 2001 ; Benbrahim & Aissa, 2005 ; Tuduri, 2005 ; Essarraï et al., 2016). Une phase de distension tardi-néoprotérozoïque a été provoquée par un raccourcissement de direction WNW et une extension de direction NNW (Levresse, 2001 ; Tuduri et al., 2018a) dans le Saghro. Cette phase tectonique permettrait la mise en place des minéralisations due à l'augmentation du volume magmatique produit, probablement en réponse aux contraintes géodynamiques en extension (Tuduri et al., 2018a). De nombreuses datations obtenues dans les gisements de métaux de base de Bou Madine (553 Ma, Levresse, 2001), de Co-Ni de Bou Azzer (533 Ma, Levresse, 2001 ; 550 Ma, Ennaciri et al., 1997) ou encore d'Ag d'Imiter (550 Ma, Levresse, 2001) corroborent cette hypothèse. Pour exemples, dans la boutonnière du Saghro, la mine argentifère d'Imiter ou le prospect aurifère de Thaghassa (Tuduri et al., 2018b) se sont formés pendant cet événement tectonique en transtension. De nombreux indices de Cu sont encaissés dans la couverture Néoprotérozoïque à Cambrienne de l'Anti-Atlas Marocain, appelée couverture Adoudounienne (Pouit, 1966 ; Bouchta et al., 1977 ; Bourque et al., 2014, 2015). Les corps minéralisés en Cu sont localisés à différents niveaux stratigraphiques au sein de la couverture. Inversement, les gisements Co-Ni de Bou Azzer, objets de ce travail, sont eux encaissés dans les roches ultramafiques datées au Néoprotérozoïque.

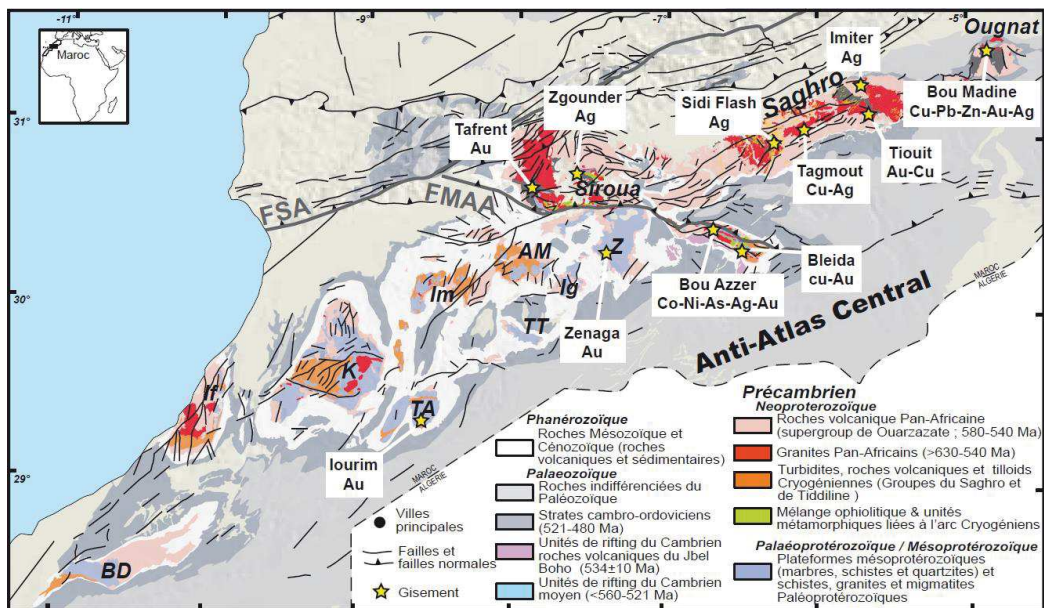


Figure I.17 : Localisation des plus gros gisements encore exploités dans l'Anti-Atlas Marocain (modifiée d'après Tuduri et al., 2018b)

**b) Les minéralisations de Bou Azzer : un district singulier d'arséniures de Co et de Ni**

(1) Historique

Le district de Co-Ni de Bou Azzer possède un passé minier ancien et encore très actif aujourd'hui. Les tribus berbères ont été les premières à exploiter les minéraux d'arséniates de Co (l'érythrine) de Bou Azzer comme insecticides et raticides. De 1934 à 1987, la production industrielle prend le relais sur les exploitations artisanales. Plusieurs sociétés entreprendront l'exploitation du gisement de Bou Azzer pour le Co, l'As, le Ni et l'or (Au). L'exploration se basera sur un modèle de systèmes hydrothermaux hercyniens associés à des massifs de serpentinites. En 1987, lors de la reprise de l'activité et la découverte de nouveaux gisements par la Compagnie de Tifnoute Tirhanimine (CTT) appartenant au Groupe MANAGEM, s'oriente sur l'exploitation du Co, ce qui fait que Bou Azzer représente environ 8% de la production mondiale annuelle de ce métal (Hawkins, 2006). En effet, 1800 tonnes de métal de Co, 188 t de Ni, 352 kg d'Or sont exploités par an à la mine de Bou Azzer d'après le rapport annuel de 2016 du Groupe MANAGEM.

(2) Le modèle de formation

Les premiers modèles proposent déjà qu'une combinaison de phénomènes (magmatiques et tectoniques) soient à l'origine des minéralisations de Bou Azzer (Leblanc, 1975). Le district est composé de plus de 100 gisements exploités pour le Co, le Ni, l'As et l'Or, toujours spatialement associés au contact entre la serpentinite et la diorite quartzique (le plus fréquemment) ou les roches volcaniques du Supergroupe de Ouarzazate. Plusieurs types de corps minéralisés au sein des différents gisements du district de Co-Ni de Bou Azzer, ont été étudiés individuellement avant d'être caractérisés en 4 types de minéralisations (Leblanc & Billaud, 1982 ; Maacha et al., 2005) :

- i) le type *veine des filons 7/5* est contrôlé par des failles majeures Panafricaines recoupant le contact entre la serpentinite et la diorite quartzique et montre une orientation ENE/WSW. L'altération hydrothermale de la serpentinite en liswénite est considérée comme le réceptacle de la minéralisation ;
- ii) le type *Tamdrost* est représenté par des corps minéralisés de type veines également mais en remplissage de fractures extensives et de lentilles au contact discordant entre la serpentinite et les roches felsiques du Supergroupe de Ouarzazate. Les carapaces d'Ambed constituent le métallotecte principal de ce type de minéralisation ;
- iii) le type *Méchoui* inclut des veines secondaires orientées NW et NE et comprises dans la diorite quartzique au contact avec les serpentinites ;
- iv) les filons de type *Aït Ahmane*, encaissés dans les diabases et les gabbros du complexe ophiolitique de Bou Azzer.

Un modèle géométrique des minéralisations a été ensuite proposé par Maacha (1994) et Maacha et al. (2012). Ce modèle prend en compte les deux principaux types de minéralisation à Bou Azzer (Figure I.18) : i) les minéralisations localisées au contact entre la serpentinite, la diorite quartzique et les roches du Supergroupe de Ouarzazate sont appelées « **Amas** » et ii) les failles minéralisées enrichies en Co recoupant la diorite quartzique et la serpentinite sont appelées « **Croiseurs** ». Cette distinction en deux types de corps minéralisés est celle qui est toujours utilisée par les travaux d'exploitation et d'exploration actuels.

La séquence paragénetique des minéralisations de Bou Azzer a été fréquemment définie et discutée par différents auteurs (Leblanc & Billaud, 1982 ; Ennaciri, 1995 ; Dolansky, 2007 ; Ahmed et al., 2009 ; Gervilla et al., 2012). Tous ne s'accordent pas sur les mêmes stades paragénetiques mais sur une évolution des minéralisations d'arséniure de Ni, de Co et de Fe, vers des sulfo-arséniures de Co et de Fe et des sulfures au sein de gangues siliceuses à carbonatées. Des métaux natifs se retrouvent associés aux différentes générations de minéralisations : l'Au le Bi et parfois l'Ag.

Maacha et al. (2011, 2015), par exemple, décrit une paragenèse en 4 stades associée aux structures des « **Croiseurs** » : (1) un stade anté-arséniures composé principalement de quartz et de sulfures (chalcopryrite, molybdénite, sphalérite et pyrite), (2) un stade arsénié composé de quartz, d'arsénopyrite, de skuttérodite massive, de cobaltite, d'or natif, d'arséniures de Ni, de Fe et de carbonates (dolomie et calcite) ; (3) un stade à sulfures sulfo-arsénié et à sulfures et éléments natifs ; (4) un stade d'altération supergène composé par du quartz, de la calcite, des arsénates, des sulfates, des hydroxydes de Co, de Ni et de Fe, de la cuprite, de l'azurite, et de la malachite.

Dolansky (2007) propose les stades minéralisateurs suivants dans les « **Amas** » et les « **Croiseurs** » : (1) stade précoce de quartz et de calcite, (2) stade de brannerite et d'or natif, (3) stade de triarséniures de Co, Ni et de Fe, (4) stade de diarséniures de Co, Ni et de Fe et de sulfo-arséniures; (5) stade à quartz, feldspath potassique et sodique (adulaire, albite) et de phase riche en titane (titanite, rutile); (6) stade à phyllosilicates (chlorite, muscovite) associé à de la brannerite, des sulfures et des sulfosels; (7) dernier stade surtout caractérisé par des carbonates. Cette paragenèse est uniquement décrite dans les « **Croiseurs** ».

Ennaciri (1995) couple les deux types de minéralisations, les « **Amas** » et les « **Croiseurs** » et propose une séquence paragénetique débutant par la gangue siliceuse suivie de la formation d'arséniures de Ni, de Co, de Fe, de sulfures et se terminant avec une gangue carbonatée (calcite et dolomite).

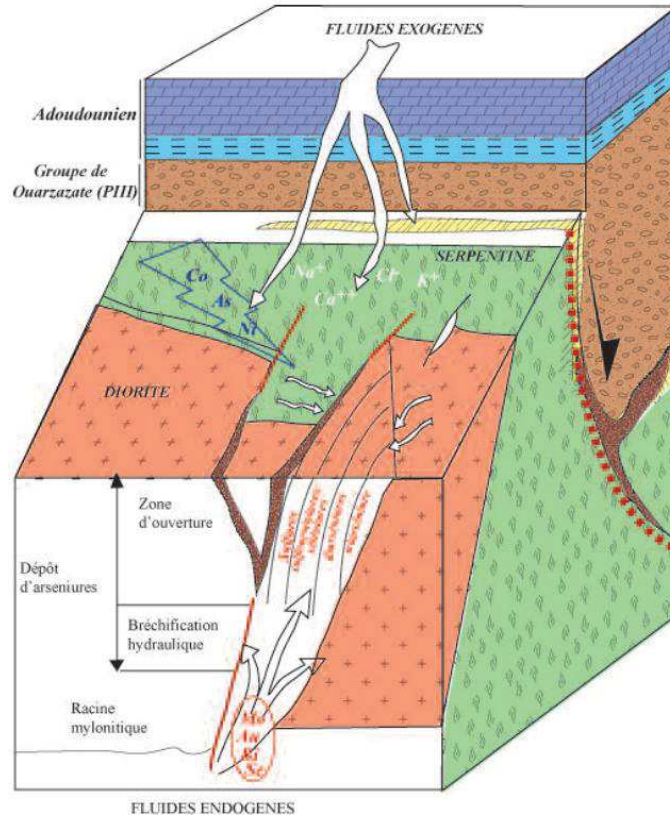


Figure I.18 : Modèle génétique des minéralisations cobaltifères et nickélifères de Bou Azzer (modifiée d'après Maacha, 1994 ; Maacha et al., 2012)

Un secteur très restreint, proche des *filons* 7/5 (Figure I.19) représente le seul gisement argentifère de la boutonnière de Bou Azzer. L'Ag apparaît sous forme disséminé et est associé à une altération hydrothermale à albite et feldspath potassique affectant la diorite quartzique. Des veines minéralisées en argent, safflorite, loellingite, sulfures à métaux de base, quartz et calcite sont localisées proche du contact rodingitique avec la serpentinite (Leblanc & Lbouabi, 1988) et recoupent la diorite (Figure I.19). Ce gisement a été exploité au niveau du chantier minier de *Tizi* et du *Filon 5* où 500 à 600 g/t d'Ag sont inclus dans la diorite quartzique (Jouravsky, 1952) (Figure I.19). Il n'a toutefois pas pu être visité pour ce travail. Il a été interprété par Leblanc & Lbouabi (1988) et Ennaciri et al. (1997) comme un réseau de veines de type stockwerk contemporain à la rodingitisation de la diorite quartzique avec la serpentinite à environ 290-350°C.

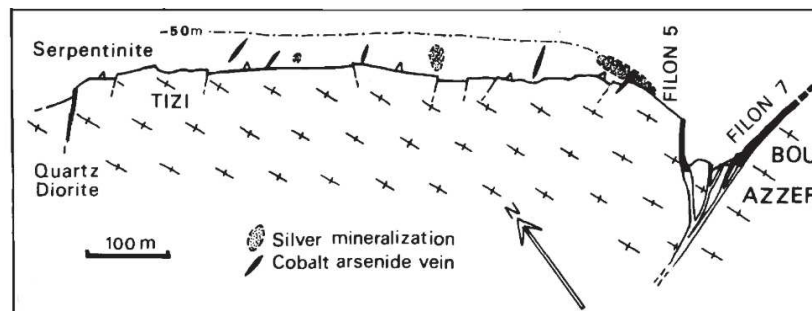


Figure I.19 : Distribution des minéralisations argentifères de Bou Azzer (Leblanc & Lbouabi, 1988)

(3) Les hypothèses sur l'origine, la source et l'âge du gisement de Bou Azzer

Plusieurs hypothèses ont été faites sur l'origine des minéralisations de Bou Azzer. Elles sont ici listées par ordre chronologique :

- Les minéralisations seraient liées à un événement hydrothermal hercynien dans lequel l'As, le CO<sub>2</sub> et la silice auraient une origine soit profonde (Jouravsky, 1952 ; Gouloubinow, 1956), soit hydrothermale infracambrienne associée à l'activité volcanique du système du Jbel Boho situé proche, 10 km environ au Sud-Est, de la boutonnière de Bou Azzer (Kroutov, 1970).
- Une autre hypothèse suggère que l'origine du Co soit associée à la serpentinite, à la magnétite et à certains niveaux riches en sulfures (Leblanc, 1981). Leblanc (1981) relie la formation des minéralisations à la carapace d'Ambed comme un dépôt de Co sédimentaire dans des chenaux. Les gisements de Bou Azzer seraient issus de déformations et de remobilisations d'âge Panafricain et Hercynien.
- Maacha et al. (2012) présentent un modèle géométrique des minéralisations, utilisé par les géologues miniers (Figure I.18). Les minéralisations ont alors été séparées clairement en deux types de corps minéralisés : le type « **Amas** » et le type « **Croiseurs** ». Ce modèle a évolué vers un système polyphasé associé à un mélange entre i) des fluides exogènes chargés en chlorures, Co, Ni et As, lessivés des serpentines ; et ii) un fluide volcanogène porteur de sélénium, molybdène, Bi et Au. Les accidents majeurs panafricains hérités auraient pu servir de conduits aux fluides minéralisateurs. Ce modèle reprend les idées publiées par Ennaciri (1995) et Ennaciri et al. (1997). Dans ces travaux, l'étude menée par Ennaciri et al. (1997) compare la paragenèse et la chimie des fluides, très salins, de Bou Azzer à celle du gisement Cobalt au Canada (Petruk, 1971).
- D'autres études, plus récentes, relient le gisement de Bou Azzer à la circulation de saumures de bassins et de saumures magmatiques riches en sodium et en As. Les saumures sont ensuite transportés en solution, sous forme de complexes chlorurés et précipités dans les pièges structuraux des « **Amas** » et des « **Croiseurs** » (Ennaciri et al., 1997 ; Essarraï et al., 2005 ; Dolansky, 2007). Burisch et al. (2017) et Markl et al. (2016) attribuent les gisements de Bou Azzer au type de gisement des « Five-element veins ». Le système hydrothermal de Bou Azzer, présente des similitudes quant aux paragenèses minérales, à la présence en méthane, de saumures et de chlore, aux températures et aux pressions de formation des minéralisations.

L'âge de formation du gisement fait également encore débat entre une mise en place des minéralisations au Précambrien pendant l'orogénèse Panafricaine ou Dévonienne lors de l'orogénèse Hercynienne. Concernant l'hypothèse la plus jeune, Essarraï et al. (2005) propose que les fluides minéralisateurs soient issus de la circulation de fluide de bassins dans des roches évaporitiques lors



des stades précoces de l'ouverture de l'Atlantique. Levresse (2001) a déterminé un âge Ar/Ar muscovite à  $392 \pm 15$  Ma et un âge adulaire à  $218 \pm 8$  Ma, respectivement dans les « **Croiseurs** » du chantier minier de *Tamdrost* et du *Filon 7/5*. Dolansky (2007) a obtenu des âges U/Pb sur brannérite dans une veine du *Filon 7/5* entre 385 et 375 Ma. Dolansky (2007) a relié ces âges à la tectonique pré-collisionnelle de l'orogénèse hercynienne. Inversement, des âges plus vieux ont été obtenus dans les mêmes objets. Des veines de Co recoupant des sills de trachytes ont été datées en U/Pb sur zircon à  $533 \pm 2$  Ma (Levresse, 2001) et  $531 \pm 5$  Ma (Gasquet et al., 2005). Ennaciri et al. (1996) ont calculé un âge à 550 Ma dans une brannérite reliée aux minéralisations de Co des « **Croiseurs** ».

**Chapitre II : Etude pétro-structurale du gisement de Bou Azzer**



## A. Introduction

### 1. Problématique

L'étude du gisement cobaltifère et nickélicifère de Bou Azzer s'est basée sur des études structurales à l'échelle des affleurements, pétrographiques et texturales avec l'observation de nombreuses structures minéralisées. Cette étude multi-échelle permet de comprendre la mise en place des minéralisations dans le contexte de la mine et de la boutonnière. Dans ce chapitre, l'étude pétro-structurale présentera la relation entre les failles, les minéralisations et les encaissants, permettant de construire un modèle structural et métallogénique du gisement. Suite à cette première partie, l'article soumis dans la revue scientifique *Ore Geology Reviews*, synthétisera ces différents points et présentera, notamment, le modèle de formation des minéralisations de Bou Azzer.

### 2. Méthodologie

#### a) L'étude de terrain du district de Bou Azzer

Dans le cadre de cette thèse, j'ai effectué une mission de trente-deux jours au district cobaltifère et nickélicifère de Bou-Azzer. Onze gisements ont été étudiés en galeries, six carrières et une tranchée en surface dans tout le district de Co-Ni de Bou Azzer (Tableau II.1). Les figures II.1 et II.2 localisent les gisements suivant : *Taghouni, Bou Azzer centre – Puit 3, Bou Azzer Est – Puits 3 et Puit 6, Aghbar, Oumlil, Bouismass, Tamdrost, Aït Ahmane : Filon 53 et Zone D, Carrière : Bou Azzer Est, Filon 52 et Filon 55, Surface : Filon 2, Filon 7 (Bou Azzer centre) et Tranchée à Bou Azzer Est.* Un échantillonnage rigoureux a été effectué sur les différents chantiers visités dans le district de Bou Azzer – El Graara. Cela représente un total de 165 échantillons récoltés sur les différentes structures minéralisées rencontrées, englobant les minéralisations massives, les poches, les veines ainsi que les failles stériles étudiées à différents niveaux et selon leurs localisations (Annexe II.1).

**Tableau II.1 : Tableau des localisations, des profondeurs d'échantillonnage dans différents gisements de Bou Azzer et des coordonnées en WGS84 et le type de minéralisations exploité (Min. mass. : minéralisations massives)**

Localité	Puit	Profondeur (m)	Longitude	Latitude	Veines	Min. mass.
Taghouni	puit taghouni	-80/-120	30°31'35"N	6°55'48"W	x	
Bou Azzer Centre	puit 3	-420	30°31'13"N	6°54'48"W	x	x
Bou azzer EST	puit 3	-320/-302	30°30'59"N	6°53'44"W	x	x
Bou azzer EST	puit 6	-510	30°30'57"N	6°53'35"W	x	x
Aghbar	puit 100	-325/-365/-405	30°31'35"N	6°49'06"W	x	x
Oumlil	-	-77	30°31'22,55"N	6°47'6,89"W	x	
Bouismass	puit 2	-390	30°30'55"N	6°47'18"W	x	x
Bouismass	puit 1	-80	30°30'59"N	6°45'15"W	x	x
Tamdrost	-	-20	30°31'23.9"N	6°47'06.8"W	x	
<i>Aït Ahmane</i>						
Filon 53	-	-115/-200/-240	30°28'01"N	6°35'16"W	x	x
Zone D	-	-200	30°29'50"N	6°37'21"W	x	

Localité	Puit	Profondeur (m)	Longitude	Latitude	Veines	Min. mass.
<i>Carrière</i>						
Bou Azzer Est	-	surf.	30°31'01.8"N	6°53'41.2"W		
Filon 52	-	surf.	30°28'15"N	6°35'41"W		x
Filon 55	-	surf.	30°31'22"N	6°47'13"W		x
<i>Surface</i>						
Filon 2	-	surf.	30°31'24.4"N	6°54'32.5"W		x
Filon7	-	surf.	30°31'13"N	6°54'48"W	x	
Bou Azzer Est tranchée	-	surf.	30°31'15.7"N	6°53'46.8"W		

### b) Cathodoluminescence

La cathodoluminescence (CL) est causée par l'interaction entre un faisceau d'électron et la surface d'un minéral qui va générer des électrons rétrodiffusés, secondaires ou des rayons X. La CL permet de visualiser les défauts de structures, les différentes zones de croissances, les textures, les différences de composition chimique ou la structure interne des minéraux étudiés. Ces défauts sont reliés à l'incorporation de certains éléments en traces (par exemple,  $Mn^{2+}$ ,  $REE^{2+/3+}$ ,  $Cr^{2+}$ ) ou des défauts de la matrice du minéral (impureté, trous, bord cassé) (Götze, 2012). Les minéraux semi-conducteurs et « isolants » étudiés lors de cette thèse furent essentiellement des silicates, carbonates et apatites, ces derniers émettant une luminescence en CL (Götze, 2012). L'analyse spatiale et spectrale en CL permet de remonter à la nature des matériaux semi-conducteurs et des transitions chimiques ainsi qu'à la localisation des éventuels défauts et impuretés.

### c) Microsonde électronique

165 lames minces polies (30  $\mu m$ ) ont été réalisées pour comprendre les caractéristiques pétro-structurales des différents types de minéralisation exploités dans le district de Co-Ni de Bou Azzer (Annexe II.1). La microanalyse a été réalisée à l'aide d'un microscope électronique à balayage FEI 100 FEI Quanta FEG 100 et d'une microanalyse à sonde électronique Cameca SX100 (EPMA) au Service interrégional Microsonde-Sud de Montpellier sur 6 lames minces des différents types de structures (Tableau II.1 et II.2).

Tableau II.2 : Tableau représentant les lames minces utilisées pour l'analyse de la serpentinite et des spinelles

	Zone	Serpentinite	Chromite	Spinelle	Albite
Lame mince	Diorite				<i>BA8b</i>
	Serpentinite	<b>BAE46a</b>	<b>BAE46a</b>		
	Min. massive		<b>BAE63c1</b>	<b>BAE63c1</b>	
	Poches				
	Veines				<b>BAE3</b>
Carapace	BAE50a	BAE50a	BAE50a		

	Zone	Feldspath K	Mica	Chlorite	Calcite	Quartz
Lame mince	Diorite	<i>BA8b</i>	<i>BA8b</i>	<i>BA8b</i>		
	Serpentinite			<b>BAE46a</b>		
	Min. massive			<b>BAE63c1</b>	<b>BAE63c1</b>	
	Poches				<b>BAE59a1</b>	<b>BAE59a1</b>
	Veines				<b>BAE3</b>	<b>BAE3</b>
	Carapace				BAE50a	BAE50a

Tableau 3 : Tableau représentant les lames minces utilisées pour l'analyse des minéraux d'intérêt économiques

	Zone	Nickeline	Rammelsbergite	Cobaltite	Skuttérodite
Lame mince	Diorite				
	Serpentinite	<b>BAE46a</b>	<b>BAE46a</b>	<b>BAE46a</b>	<b>BAE46a</b>
	Min. massive	<b>BAE21a</b>	<b>BAE21a</b>	<b>BAE21a</b>	<b>BAE21a</b>
	Min. massive	<b>BAE21b</b>	<b>BAE21b</b>		<b>BAE21b</b>
	Poches			<b>BAE59a1</b>	<b>BAE27b</b>
	Veines				<b>BAE20b</b>
	Veines			<b>BAE51b</b>	
	Veines				

	Zone	Safflorite	Loellingite	Arsénopyrite	Gersdorffite
Lame mince	Diorite		<i>BAE8b</i>		
	Serpentinite		<b>BAE21b</b>	<b>BAE46a</b>	<b>BAE46a</b>
	Min. massive		<b>BAE21a</b>		
	Min. massive	<b>BAE27b</b>	<b>BAE27b</b>		
	Poches	<b>BAE59a1</b>	<b>BAE59a1</b>		
	Veines		<b>BAE3</b>	<b>BAE3</b>	
	Veines		<b>BAE20b</b>	<b>BAE20b</b>	
	Veines	<b>BAE51b</b>	<b>BAE51b</b>		

Les éléments majeurs et mineurs ont été mesurés dans les phases solides, les arséniures et les sulfures avec un même courant de faisceau de 10nA et une tension d'accélération de 20 keV. Quinze éléments ont été analysés pour les phases solides (élément, ligne spectrale et spectromètre) : Al (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K $\alpha$ , TAP), Si (SiO<sub>2</sub>, K $\alpha$ , TAP), Cl (Cl, K $\alpha$ , PET), Ti (TiO<sub>2</sub>, K $\alpha$ , PET), Na (Na<sub>2</sub>O, K $\alpha$ , TAP), Mg (MgO, K $\alpha$ , TAP), Mn (MnO, K $\alpha$ , LLIF), Fe (FeO, K $\alpha$ , LLIF), S (SO<sub>2</sub>, K $\alpha$ , LPET), K (K<sub>2</sub>O, K $\alpha$ , LPET), Ca (CaO, K $\alpha$ , LPET), Cr (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K $\alpha$ , PET), Co (CoO, K $\alpha$ , LLIF), Ni (NiO, K $\alpha$ , LLIF), As (As<sub>2</sub>O<sub>3</sub> L $\alpha$ , TAP). Neuf éléments mineurs ont été analysés pour les métaux (élément standard, raies spectrales et spectromètres étaient les suivants): Co (Co, K $\alpha$ , LLIF), Ni (Ni, K $\alpha$ , LLIF), Fe (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,

K $\alpha$ , LLIF), Cu (Cu , K $\alpha$ , LLIF), Zn (Zn, K $\alpha$ , LLIF), Pb (PbTe, M $\alpha$ , LPET), Ag (Ag, L $\alpha$ , LPET), Au (Au, M $\alpha$ , TAP), As (GaAs, K $\alpha$ , LLIF). Les temps de comptage de pointe variaient de 60 à 240 secondes. La concentration des principaux éléments est résumée dans le tableau de l'annexe II.2, les cases vierges correspondent aux éléments sous la limite de détection de la microsonde électronique.

### 3. Spectrométrie Raman

Les mesures en spectrométrie Raman ont été effectuées par un spectromètre Renishaw Invia équipé d'un détecteur CCD au silicium refroidi par effet Peltier utilisant une longueur d'onde d'excitation laser de 532 nm (réseau de 2400 g. mm<sup>2</sup>), avec une résolution spectrale d'environ 1 cm<sup>-1</sup> (Institut de Charles Coulomb à l'Université de Montpellier). La lumière diffusée a été collectée via un objectif 100x Leica N Plan en configuration de rétrodiffusion (taille latérale du point laser d'environ 0,8  $\mu$ m). Deux acquisitions ont été sommées pour fournir un spectre.

### 4. Système QEMSCAN

L'analyse minérale automatisée et l'imagerie texturale des échantillons étudiés ont été réalisées à l'aide du système FEI QEMSCAN® Quanta 650F utilisé au Département des Sciences de la Terre, à l'Université de Genève, en Suisse. Le système est équipé de deux détecteurs à spectromètre à rayons X à dispersion d'énergie (EDS) Bruker QUANTAX. Les analyses ont été effectuées sous vide poussé, avec une tension d'accélération de 25 kV et un courant de faisceau de 10 nA sur des lames minces polies revêtues d'une couche de carbone. Le mode de fonctionnement Field Image (Pirrie et al., 2004) a été utilisé pour les analyses. Au total, 221 champs individuels ont été mesurés par échantillon, avec 1 500  $\mu$ m par champ, et un espacement des points de 5  $\mu$ m. Les 1000 comptes standards par point ont été acquis, ce qui donne une limite de détection d'environ 2% en poids par élément pour les classifications des minéraux. Les mesures ont été effectuées à l'aide du logiciel iMeasure v5.3.2 et le traitement des données à l'aide du progiciel iDiscover® v5.3.2. Les analyses permettent la réalisation i) de cartes minéralogiques de grande qualité, résolues dans l'espace et entièrement quantifiées; ii) d'images de l'ESB avec une résolution identique à celle des cartes minéralogiques; iii) de cartes de distribution des éléments. Le QEMSCAN permet des observations microscopiques et de la microanalyse EPMA, avec l'avantage de pouvoir déterminer la variabilité minéralogique basée sur la chimie à l'échelle micrométrique. En cartographiant la surface de l'échantillon, des spectres de rayons X à dispersion d'énergie (EDX) à faible compte sont générés et fournissent des informations sur la composition élémentaire à chaque point de mesure. Dans le cadre de cette thèse, des cartes minéralogiques et élémentaires de l'ensemble des structures minéralisées ont été réalisées.

## **B. L'étude pétro-structurale des minéralisations de Bou Azzer**

### **1. Observations de surface**

#### **a) Description géométrique et géologique des contacts serpentinites/roches encaissantes**

L'étude des géométries des contacts serpentinites/roches encaissantes à l'échelle de l'affleurement, qu'ils soient minéralisés ou non, est essentielle à la compréhension des relations entre les structures et permet d'avancer des hypothèses sur la nature de ces contacts. La boutonnière de Bou Azzer est composée de roches ultramafiques constituant une ancienne croûte océanique démembrée mais complète incluant du manteau serpentinitisé, des gabbros rubanés, du complexe de dyke jusqu'aux basaltes en coussin (Leblanc, 1975, 1981 ; Admou, 2000).

L'ouest du chantier minier de *Bou Azzer*, en surface présente un contact particulièrement rectiligne entre la serpentinite, la diorite quartzique et les dykes basiques (Figure II.1A et B). Les roches basiques déjà évoquées précédemment montrent une couleur sombre (Figures II.1C et II.1D). Le contact avec la serpentinite est rectiligne (Figure II.1C). La diorite quartzique en surface est légèrement folié et son contact est rectiligne avec les dykes basiques (Figure II.1D). La mise en place de la diorite quartzique dans l'histoire du complexe ultramafique de Bou Azzer n'est pas clairement expliquée. Une foliation globalement orientée N°120°E, parallèle à l'accident majeur de l'Anti-Atlas (AMAA) et à la boutonnière de Bou Azzer a été observée dans l'ensemble des serpentinites mais aussi dans d'autres unités (Figure II.2B). Une déformation plus marquée ainsi qu'une carbonatation plus intense a également été remarquée lorsque la serpentinite est localisée près des carapaces carbonatées et des birbirites. Il est important de préciser que cette variation de la déformation n'a pas pu être observée en profondeur, les chantiers s'arrêtant rapidement lorsqu'ils quittent les zones riches en minéralisation économique. Ainsi peu d'observation sur les serpentinites en profondeur ont pu être faites.



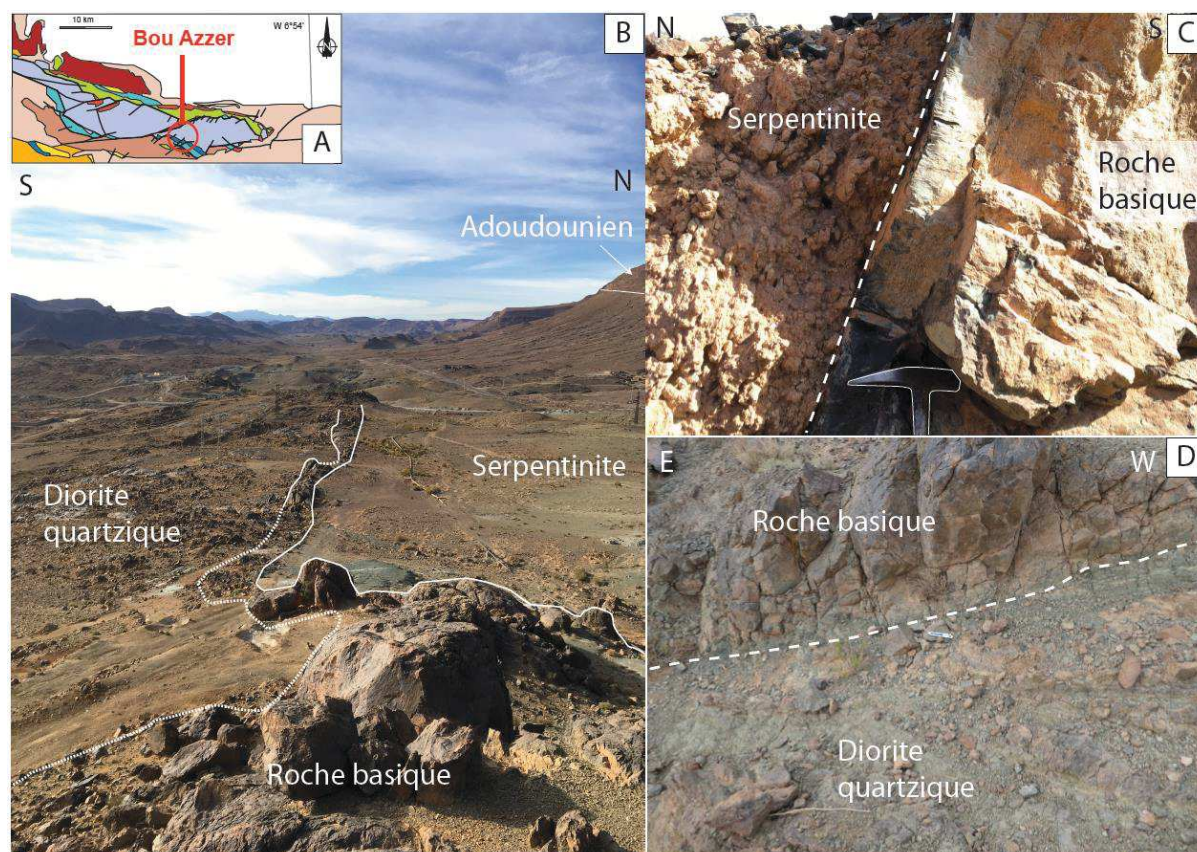


Figure II.1 : A) Localisation du chantier minier de *Bou Azzer*, la légende est la même que la figure II.1. B) Vue en surface vers l'ouest du contact entre la diorite quartzique au sud et de la serpentinite au nord avec les roches basiques. C) Vue dans le plan vertical du contact vers le nord des roches basiques avec la serpentinite. D) Contact rectiligne dans le plan horizontal avec la diorite quartzique

### b) Contexte lithologique des minéralisations

L'ensemble des minéralisations de Bou Azzer sont localisées entre les serpentinites, la diorite quartzique et les roches volcano-clastiques du Supergroupe de Ouarzazate (Figure I.10). Plusieurs observations systématiques ont été faites :

- Les serpentinites présentent une couleur brunâtre en lien avec la carbonatation de celle-ci dans l'ensemble de la boutonnière (Figure II.2A et B). La serpentinite présente également une foliation marquée par des lits de magnétite d'orientation N°120. Dans toute la boutonnière, la schistosité observée indique une forme en dôme de la serpentinite avec des pendages nord pour la serpentinite localisée au nord de la boutonnière et des pendages sud pour la serpentinite localisée au sud.
- La diorite quartzique se situe systématiquement au sud des serpentinites. La diorite quartzique décrit une texture grenue et est composée de quartz, plagioclase et biotite (Figure II.2C). Même si des minéralisations massives se rencontrent également au contact entre serpentinite/roche volcanique du complexe supérieur, les gisements les plus importants se rencontrent au contact serpentinite/diorite quartzique. Nous reviendrons dans ce chapitre sur le rôle de la diorite quartzique dans le processus de formation des minéralisations.

- La majorité des contacts entre serpentinite et diorite quartzique localisent des dykes ou des roches basiques de couleurs sombres et à texture microgrenue (Figure II.2D et E). Ces roches basiques se rencontrent systématiquement en position supérieure par rapport aux serpentinites et aux amas bréchiques de serpentinites qui servent de réceptacles à la minéralisation massive. Les relations avec la diorite quartzique sont complexes mais le plus souvent, la diorite quartzique est intrusive dans les roches et les dykes basiques (Figure II.3D). L'existence de ces niveaux montre que la diorite quartzique est intrusive au sein de l'unité mantellique (serpentinites) et de sa couverture de roche basique.

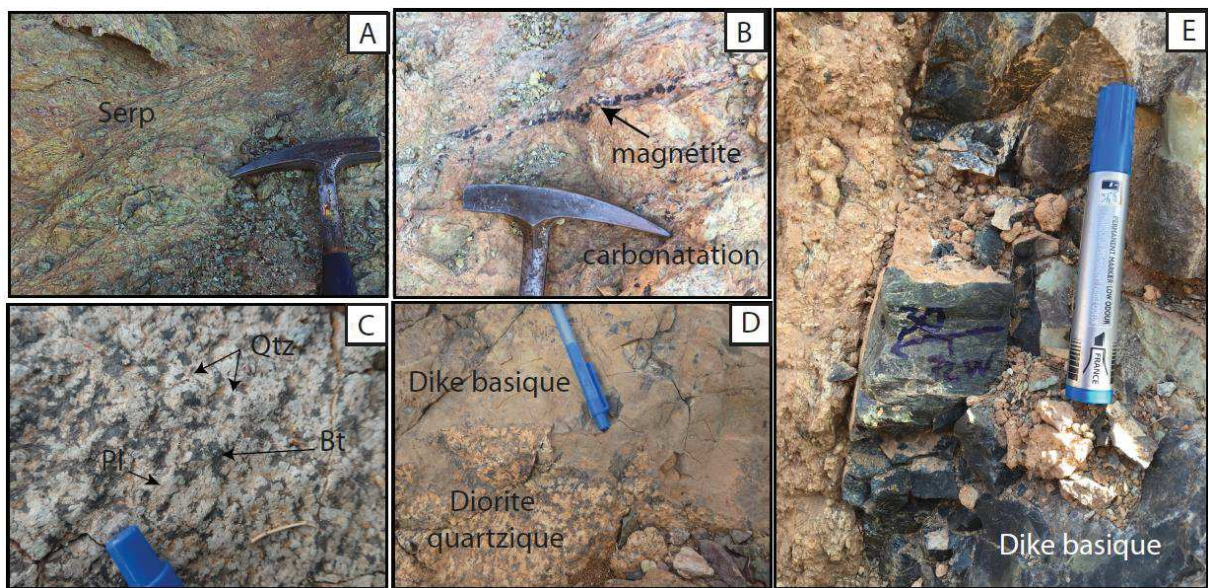


Figure II.2 : A) Serpentinite faiblement carbonatée montrant une foliation N120, B) Serpentinite carbonatée montrant des lits de magnétite parallèles à la foliation, C) Diorite quartzique composée de plagioclase, biotite et quartz, D) Dyke basique intrudé par la diorite quartzique, E) Dyke basique recoupant la serpentinite (photo d'affleurement à l'Ouest du centre minier de Bou Azzer)

### c) Carapaces carbonatées et siliceuses

Les serpentinites sont en contact avec des structures définies en surface comme étant des carapaces de la formation d'Ambed (Figure II.1) et en profondeur comme étant les minéralisations massives du gisement de Bou Azzer. Les carapaces ont été définies par Leblanc (1975) comme étant formées par l'altération d'eau météorique des contacts compris entre la serpentinite, la diorite quartzique et les roches volcaniques d'âge Précambrien. Elles peuvent également se situer au cœur de la serpentinite (*Filon 52*). Leurs formes sont lenticulaires et mesurent entre 1 et 15 mètres de large et environ 30 mètres de long. Ces carapaces montrent deux types de gangue : carbonatée (appelée carapace) ou siliceuse (appelée birbirite) :

- i) La grande majorité des carapaces observées sur le district de Bou Azzer sont carbonatées. Ces dernières sont composées d'une gangue de calcite à texture rubanée et automorphe (Figure II.3A et B) (*Filon 2*) et de minéralisations riche en arséniures de Fe la plupart du temps très oxydées (*Filon 55*) (Figure II.3B).
- ii) Les birbirites sont des carapaces essentiellement composées de quartz (Figure II.3C), de chalcopryrite, de poches géodiques à calcite rhomboédriques (Figure II.3D) et de fragments de serpentinite (Figure II.3E) (*BAE P3, Filon 7/5*). Les carapaces siliceuses ne représentent pas la majeure partie des carapaces de Bou Azzer. Peu de minéralisations massives de cobalt ou de Ni ont été observées en surface, les métaux étant certainement remplacés par des oxydes de Fe.

Les carapaces sont également recoupées par les structures de type veines qui contiennent des minéralisations de cobalt et de Fe et sont systématiquement encaissantes de grandes poches à texture géodique (Figure II.3E).

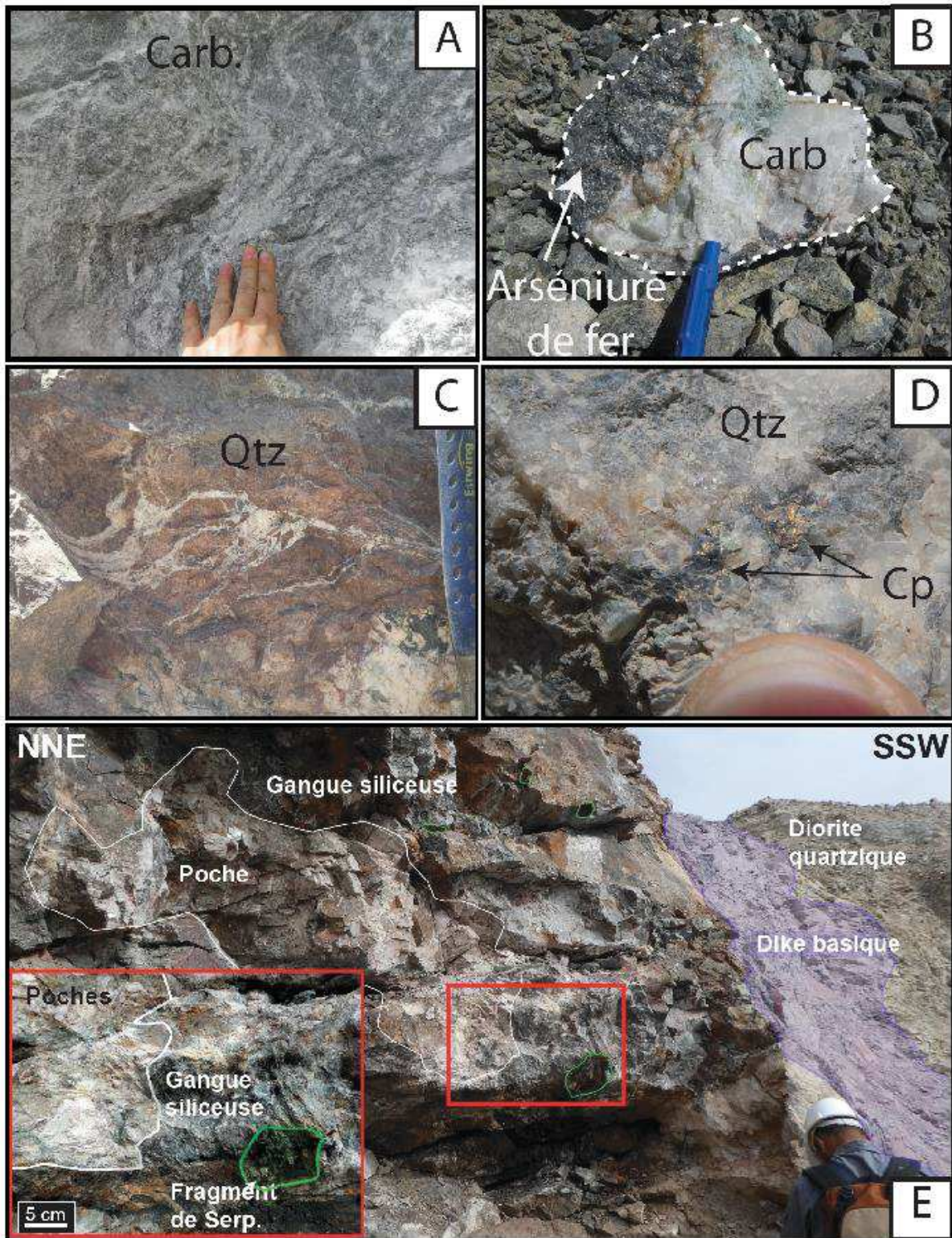
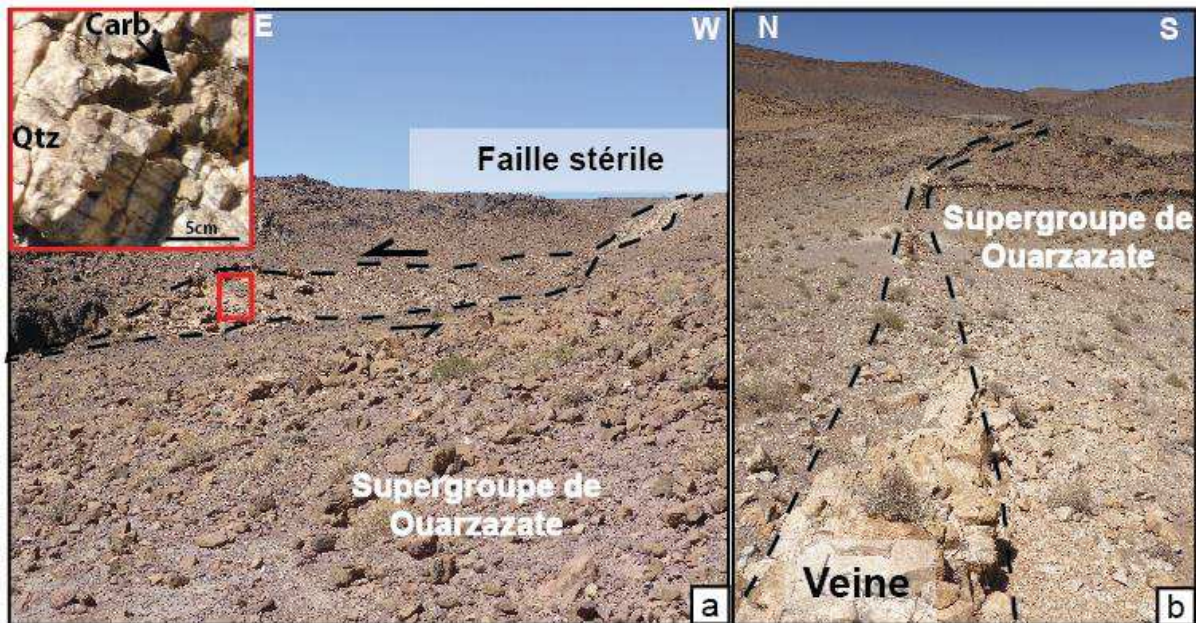


Figure II.3 : Gangue des carapaces carbonatées à texture A) rubanée, et B) automorphe du *Filon 55* (fragment de calcite à texture rhomboédrique et d'arséniures de Fe). Carapace siliceuse composée essentiellement de C) quartz, D) de chalcopyrite (*Filon 7/5*). E) Gangue siliceuse encaissant également des poches de calcite et des fragments de serpentinite (photo d'affleurement à *Bou Azzer puit 3*)

**d) Les veines minéralisées et les poches associées**

En surface, les structures veines peuvent atteindre jusqu'à des centaines de mètres de long (Figure II.4A) et se reconnaissent très bien dans le paysage. Elles recoupent toutes les unités précambriennes de la boutonnière de Bou Azzer. La majorité des veines sont stériles en surface lorsqu'elles s'éloignent d'une vingtaine de mètres des carapaces et des birbirites au contact avec les serpentinites (Figure II.4A et II.B). Les failles minéralisées sont composées de quartz et chalcopryrite, de calcite et d'arséniures de cobalt et de Fe. Toutefois, dans les deux cas, les sulfures sont remplacés par des oxydes. Sur la figure II.8A, on observe clairement une structure de pull-apart senestre qui contrôle l'ouverture et la formation de la veine. Parfois, les veines peuvent, au contact avec les serpentinites, venir se paralléliser le long du contact serpentinite/diorite quartzique (*Filon 7/5*).

Les poches géodiques sont des structures de calcites rhomboédriques incluant des fragments de minéralisations. En surface, les poches mesurent en moyenne entre 1 à 2 mètres de long et 0,5 à 1 mètre de large (Figure II.3E). Elles se rencontrent au cœur des zones bréchiques à fragments de serpentinite qui forment les minéralisations massives.



**e) Relation structurale entre les unités géologiques de la boutonnière**

Les affleurements étudiés ont permis d'observer une serpentinite fortement carbonatée. Lors de l'étude sur le terrain, il a été difficile d'observer des indicateurs cinématiques entre les structures failées séparant la serpentinite de la diorite quartzique ou des roches volcaniques précambriennes. Cependant, des contacts en faille normale ont été remarqués au site minier d'*Ambed*, décrivant un

environnement de brèches de blocs de serpentinites notamment (Figures II.1 et II.4B). Ce contact a une orientation de N160° et un faible pendage à 30°NE.

Au niveau de tranchées situées au nord de la carrière de *Bou Azzer Puit 3*, le contact entre les serpentinites, les minéralisations massives et les roches volcaniques précambriennes du Supergroupe de Ouarzazate indiquent un pendage anormal de la serpentinite vers le sud, situant le manteau serpentinisé sur les roches précambriennes (Figures II.1 et II.4C). Plusieurs hypothèses sont proposées pour expliquer la mise en place des unités géologiques : i) le jeu d'une faille listrique à faible pendage permettant la mise en place d'un morceau du manteau serpentinisé et de la carapace sur les roches volcaniques précambriennes ; ii) lors d'une phase tardive de compression, la serpentinite chevauche les roches du Supergroupe de Ouarzazate.

Actuellement, l'étude de la mise en place des minéralisations de Bou Azzer ne montre pas de consensus quant à l'âge de formation du dépôt. Les conglomérats du Supergroupe de Ouarzazate présentent une texture bréchifiée à galets de birbirite à sa base dans le secteur d'*Aghbar–Oumlil–Tamdrost* (Blein et al., 2013) (Figure II.4D). Les birbirites représentent en surface ce que les minéralisations massives comprises dans une gangue siliceuse sont en profondeur. Cet élément permet de contraindre l'âge des minéralisations à une période de mise en place lors du dépôt du Supergroupe de Ouarzazate datées à 615 – 575 Ma (Walsh et al., 2012 ; Cheillett et al., 2002 ; Thomas et al., 2002 ; Blein et al., 2014 ; Inglis, et al., 2005 ; Schiavo et al., 2007 ; Baidada et al., 2017).

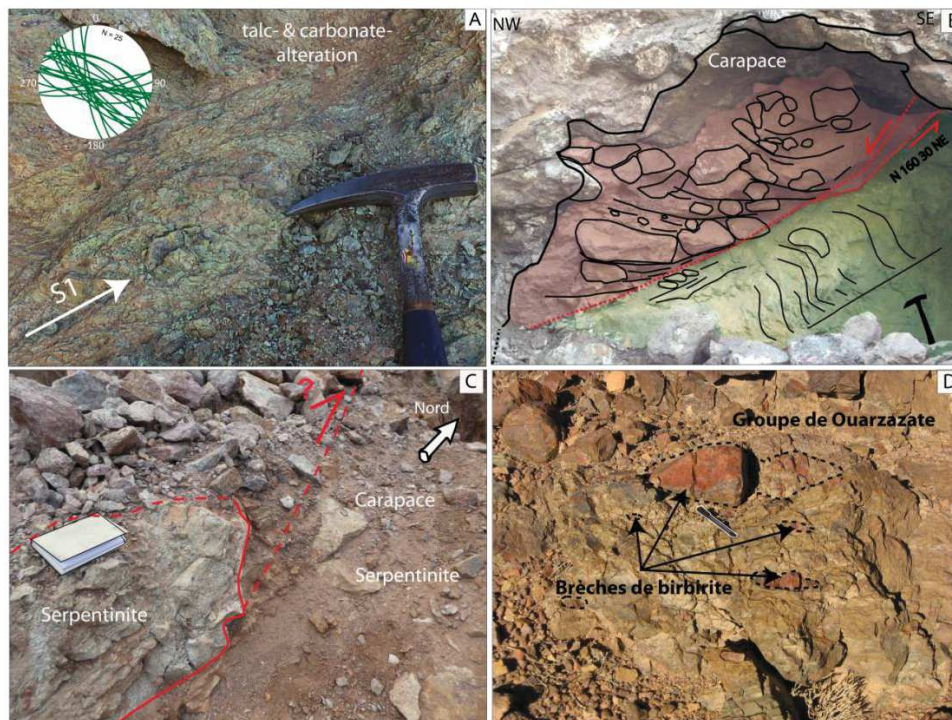


Figure II.5 : A) Schistosité (S1) orientée N120°E de la serpentinite. B) Contact en faille normale entre la serpentinite et une carapace bréchifiée (site minier d'*Ambed*). C) Contact supposé en faille inverse entre la serpentinite et les roches volcaniques Précambriennes (tranchée au nord du site minier de *Bou Azzer Puit 3*). D) brèche à éléments de birbirite dans la base du groupe de Ouarzazate (Blein et al., 2013)

Lors de l'étude de terrain menée en Janvier 2017, trois coupes présentent les relations entre ces différentes unités : la serpentinite, les dykes basiques, la diorite quartzique, les carapaces de la formation d'Ambed (ou carapaces d'Ambed), le groupe de Tiddiline, les roches volcaniques précambriennes du Supergroupe de Ouarzazate et la formation sédimentaire de (Figures II.5, 6 et 7).

Des fragments de serpentinites fraîches se trouvent encaissés par une matrice de serpentinite carbonatée et foliée. Cette zone représente un contact bréchiq ue entre les deux carapaces carbonatées d'Ambed (Figure II.6A et B). Le contact majeur entre la serpentinite et les carapaces montre un jeu normal, mis en évidence par une structure en pull-apart au sein même de la carapace (géode de dissolution) (Figure II.6C). La serpentinite est très affectée par des plans de schistosité d'orientation N100 50° NE et la foliation s'intensifie à l'approche des carapaces d'Ambed (Figure II.6D). Les roches volcaniques du Supergroupe de Ouarzazate viennent recouvrir en discordance l'ensemble des roches de cette section (Figure II.6).

La coupe d'Ambed présente la relation entre serpentinite/carapace, serpentinite/roches mafiques (associées au complexe ultramafique de Bou Azzer) et roches mafiques/Supergroupe de Ouarzazate (Figure II.7). La foliation montre un pendage sud de 50° de la serpentinite. Au contact avec la carapace carbonatée, la serpentinite montre un aspect folié plus important et une texture bréchiq ue (Figure II.7A). Plus au Sud, la coupe se poursuit vers un contact entre serpentinite/carapace/roches mafiques supposé normal et mis en évidence par une méga-brèche composée de fragments de serpentinite, de carapaces et de roches mafiques. La coupe est délimitée au sud par le contact faillé entre les roches du Supergroupe de Ouarzazate et un dyke basique. Ce contact joue en faille inverse d'orientation N60°, de pendage 48°N et mis en évidence par des cisaillements (Figure II.7C). Les contacts entre la serpentinite, la diorite quartzique, les carapaces, les roches mafiques et les roches volcaniques précambriennes sont faillés en jeu normal. L'aspect en dôme des serpentinites est également remarqué, avec des pendages nord au nord, mis en évidence dans les coupes de Bou Offroh et du Filon 2 (Figures II. 5 et II.6), et des pendages sud au sud représentés dans la coupe d'Ambed (Figure II.7).

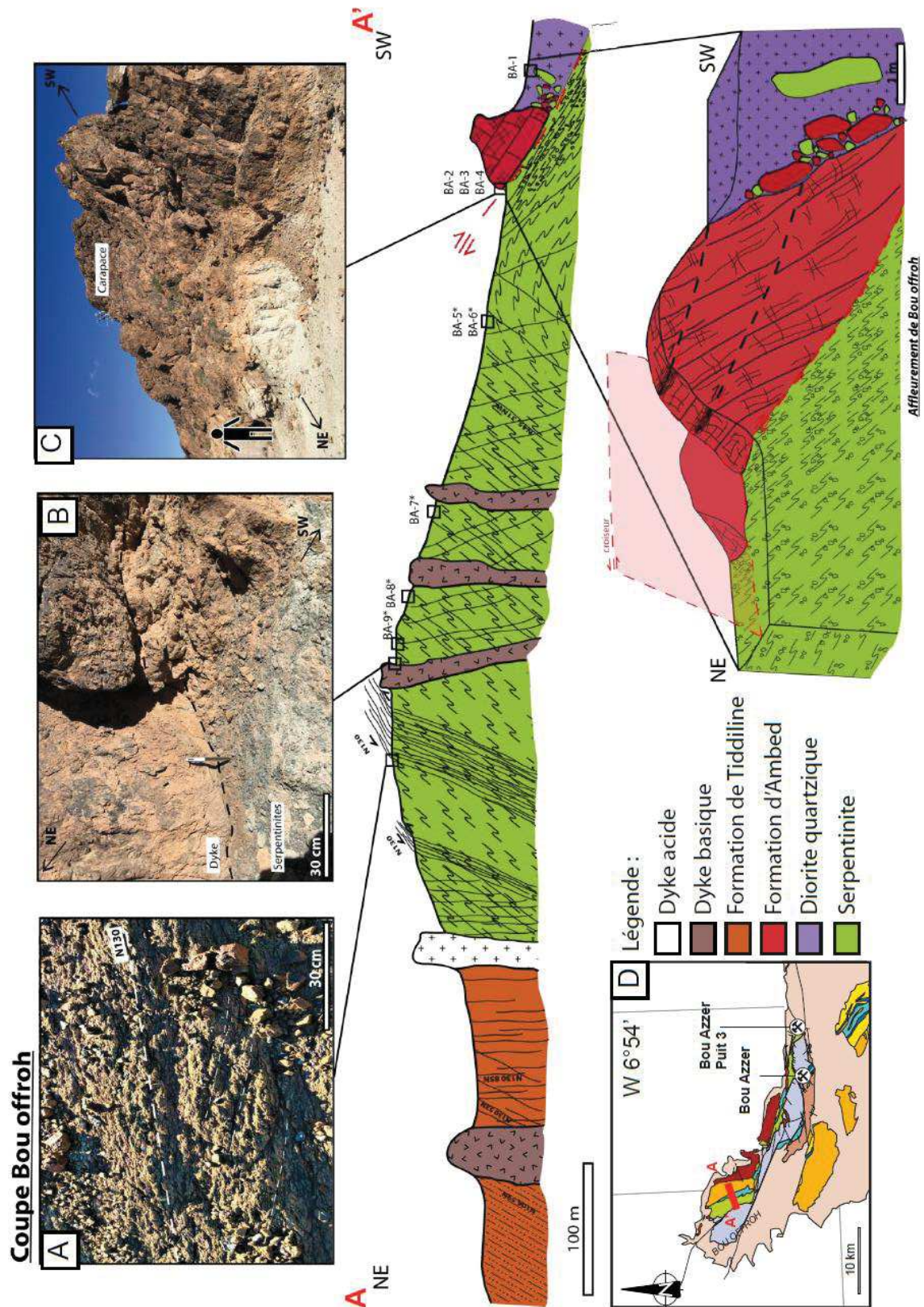


Figure II.6 : Coupe de terrain représentant la coupe de Bou Offroh. A) Foliation de la serpentinite à N130°E. B) Contact entre les dykes basique et les serpentinites. C) Photographie de la carapace (formation d'Ambed). D) Localisation sur la boutonnière de Bou Azzer. Les échantillons localisés sur la coupe sont visibles dans Paquez (2017)



Coupe Filon 2 - Bou Azzer centre

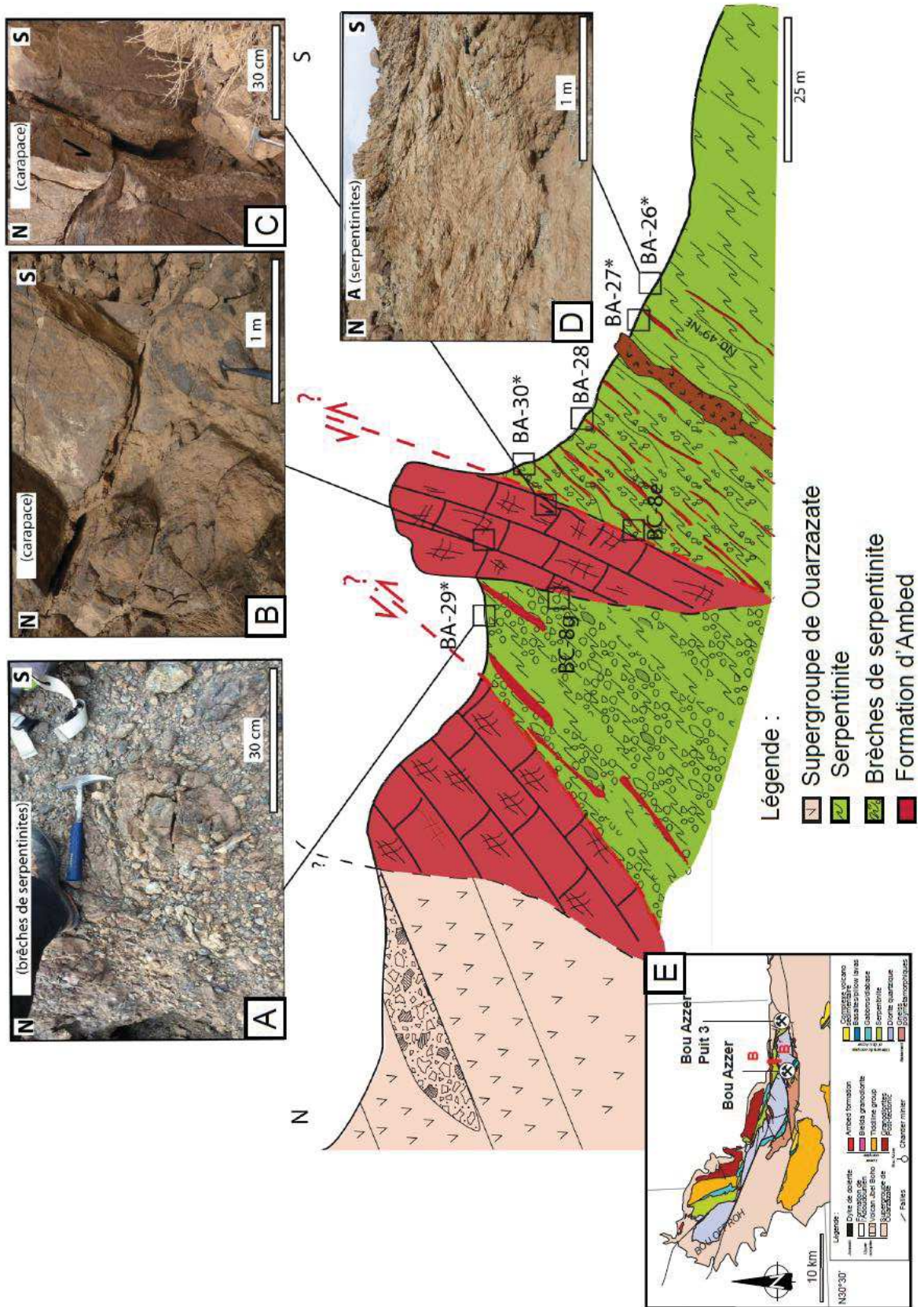


Figure II.7: Coupe de terrain représentant la coupe du Filon 2. A) Brèches de serpentinite. B) Photographie de la carapace (formation d'Ambed). C) Poches de dissolution observée dans la carapace (formation d'Ambed). D) Forte foliation et carbonatation de la serpentinite proche de la carapace. E) Localisation de la coupe sur la boutonnière de Bou Azzer. Les échantillons localisés sur la coupe sont visibles dans Paquez (2017)

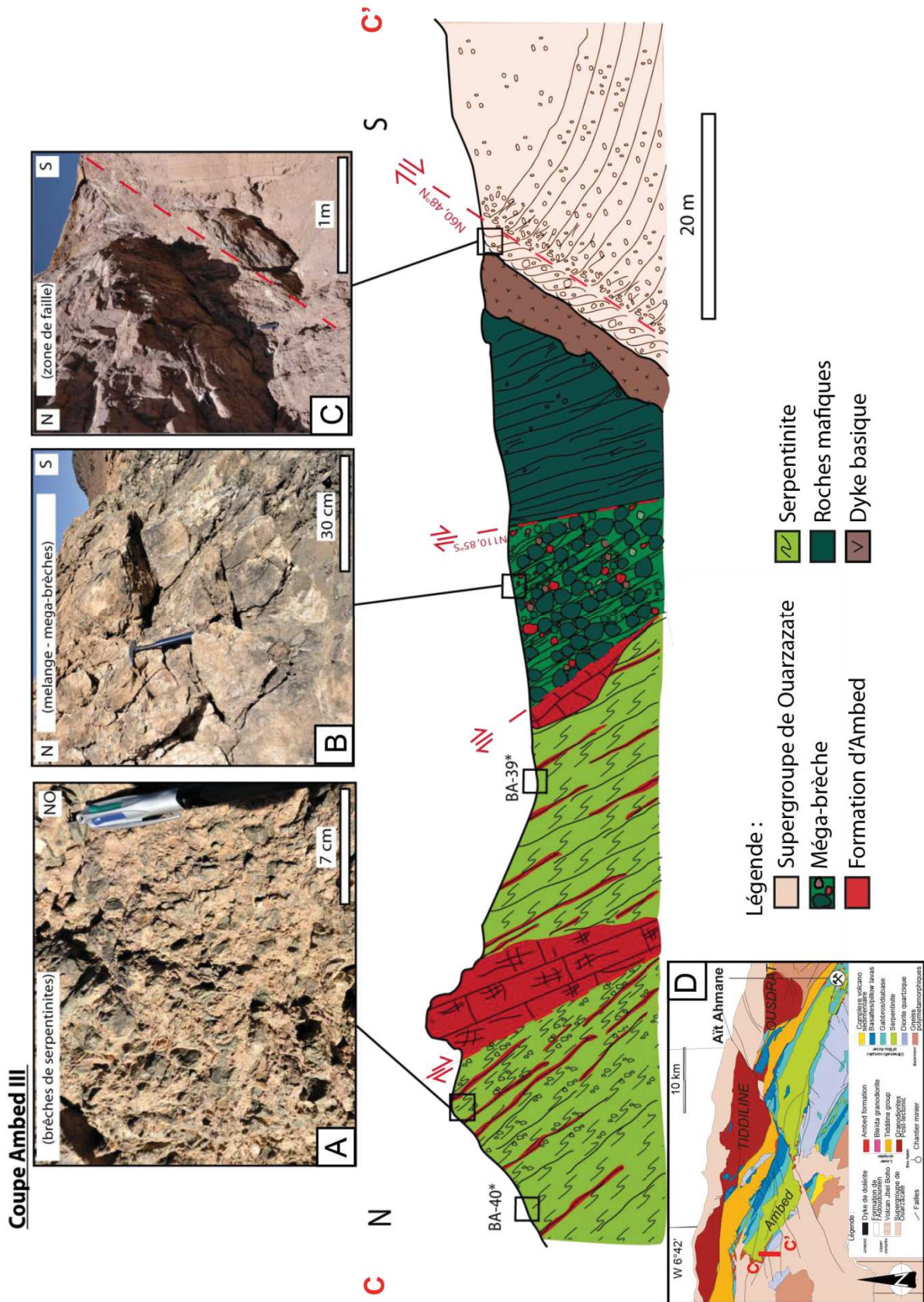
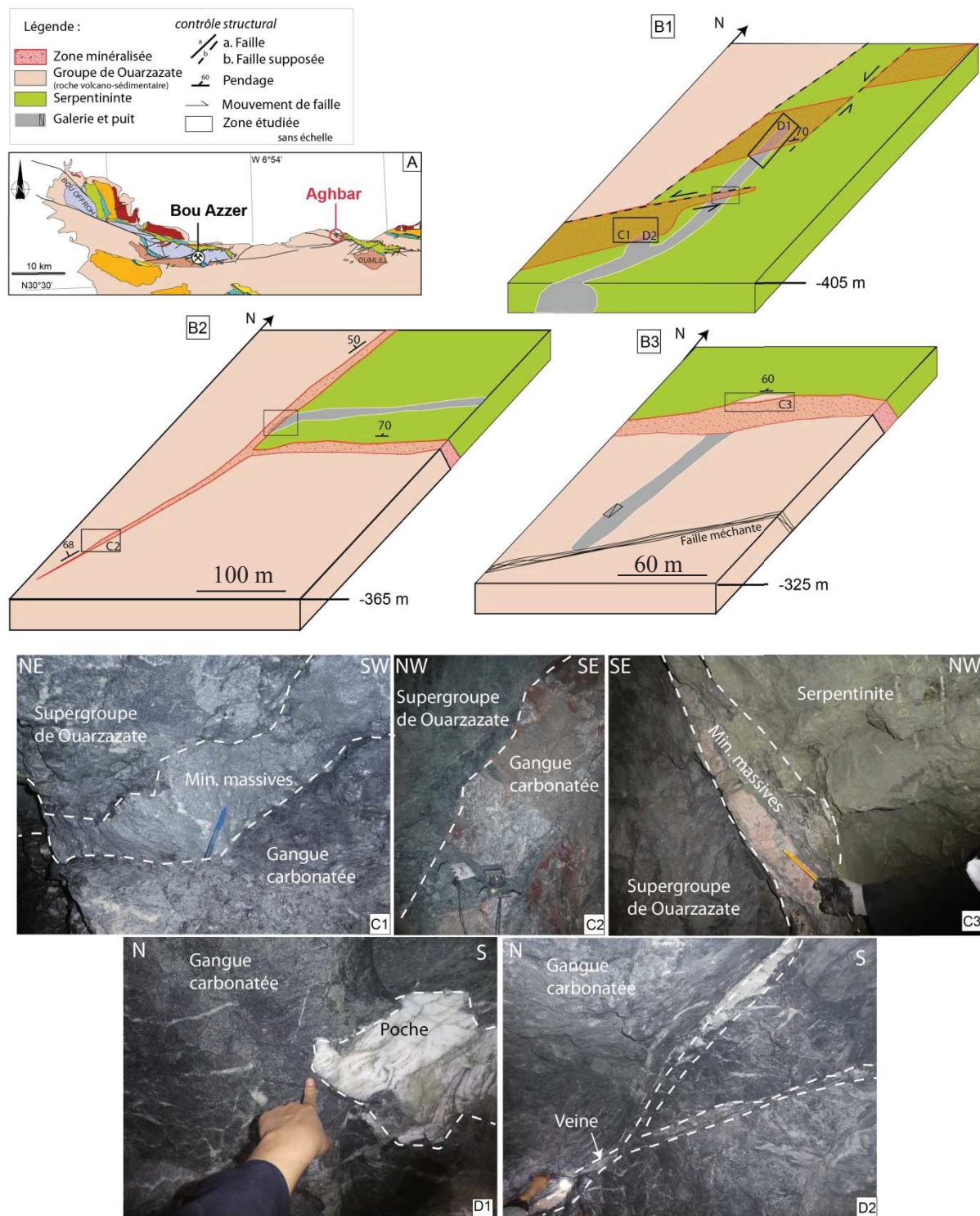


Figure II.8: Coupe de terrain représentant la coupe de Ambed. A) Brèches de serpentinite. B) Méga-brèche à fragments de roches mafiques, de la formation d'Ambed et de dykes basique. C) Contact faillé entre les roches mafiques et les roches volcaniques du supergroupe de Ouazazate. D) Localisation sur la boutonnière de Bou Azer. Les échantillons localisés sur la coupe sont visibles dans Paquez (2017)

## 2. Observations en profondeur

En profondeur, mon travail combiné à celui des géologues miniers a permis de déterminer les gisements à étudier ainsi que les différents types de minéralisation sur lesquelles le travail est ciblé.

- Lors de l'étude de terrain, le site minier d'*Aghbar*, situé à l'ouest du centre minier de Bou Azzer, montre une particularité structurale (Figure II.9A). Les minéralisations massives sont comprises entre la serpentinite et les roches volcano-sédimentaires du Supergroupe de Ouarzazate. Ce gisement a été décrit comme étant un dôme de serpentinite bordé par des failles permettant la remontée du manteau serpentinitisé (Leblanc, 1975) à pendage nord au nord et sud au sud. La serpentinite montre un pendage vers le nord au contact Sud avec les roches précambriennes volcano-sédimentaires (Figures II.9B2, B3, C2 et C3). Les minéralisations de Co, Ni et Fe appartenant aux structures extensives montrent de fort pendage de 60° et 70° avec des épaisseurs variables allant de quelques dizaines de centimètres à quelques dizaines de mètres (Figure II.9C). Texturalement, le contact entre les minéralisations massives et leur encaissant (serpentinite et roches précambriennes volcano-sédimentaires) paraît rectiligne (Figure II.9C1) où une texture friable est visible notamment dans la figure II.9C3. Le gisement d'*Aghbar* ne montre pas de différence dans sa paragenèse minéralogique; uniquement concernant l'encaissant au contact avec les minéralisations massives. Des poches et des veines ont également été observées au sein des minéralisations massives, du gisement d'*Aghbar*. Les poches montrent la même paragenèse : du quartz en bordure de structure et de la calcite rhomboédrique au centre (Figure II.9D1). La veine recoupant la gangue carbonatée est composée de quartz, de calcite, de dolomite rose et de minéralisations de Co et de Fe (Figure II.9D2). La partie nord du contact entre la serpentinite et les roches du Supergroupe de Ouarzazate n'a pas pu être étudiée.
- Le site minier de *Taghouni*, situé le plus à l'est de la boutonnière, présente un contexte particulier des minéralisations de Bou Azzer (Figure II.10). Ce gisement est uniquement composé de veines minéralisées en arséniures de Co et de Fe (Figure II.10B). Ce réseau de veines orientées perpendiculairement au contact entre la serpentinite et la diorite, présente un mouvement senestre, décalant vers le sud-ouest la serpentinite (Figure II.10B). Les veines sont minéralisées lorsqu'elles se trouvent proches du contact avec la serpentinite (Figure II.10C). En l'absence de veine le contact entre la diorite et la serpentinite est rodingitique (Figure II.10D1), une altération particulière causée par les veines recoupant la diorite est observée. La diorite montre une couleur rougeâtre aux abords des veines, cette altération n'a pas encore été définie (Figure II.10D2).



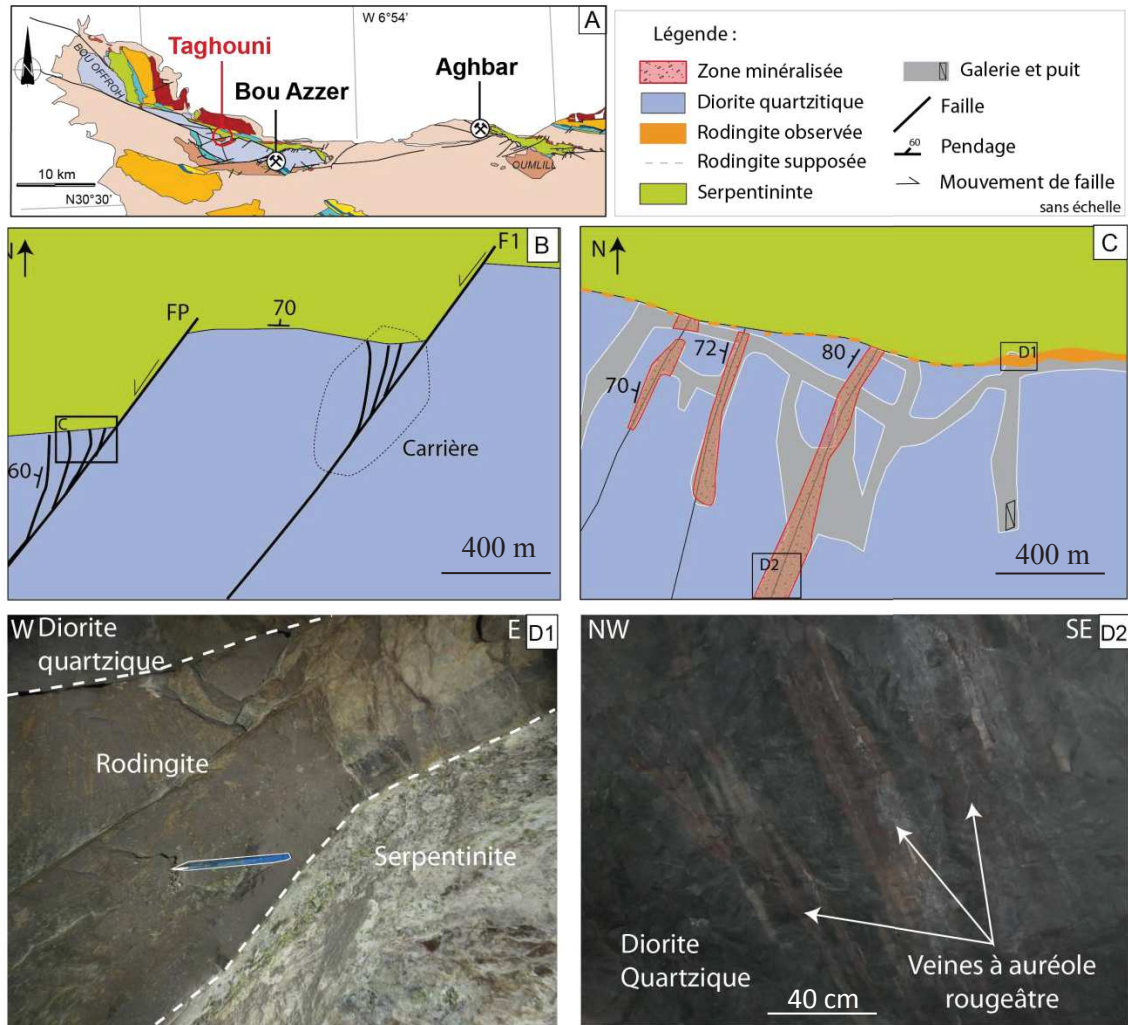


Figure II.10 : A) Localisation du gisement de *Taghouni*, la légende est la même que la figure II.1. B) Carte en surface du chantier de *Taghouni*. C) Zoom des veines minéralisées et du contact rodingitique entre la serpentinite et la diorite quartzique. D1) Photo du contact rodingitique. D2) Réseau de veines à auréoles d'altération dans la diorite quartzique

**a) Les roches encaissantes des minéralisations**

La serpentinite est systématiquement recoupée par des veines de calcite blanche et contient au contact avec les minéralisations massives de la chalcopyrite (Figure II.11A). Peu de lits de magnétite préservés ont été observés certainement parce qu'ils ont été remplacés par des minéraux de cobalt et de Ni. La foliation orientée N120° est cependant toujours observable. Les quelques affleurements observés semblent indiquer que la carbonatation des serpentinites est moins importante qu'en surface. Toutefois, cette observation ne peut être confirmée par manque d'observations répétées. Des niveaux de rodingite, minéral résultant d'un métamorphisme de contact, ont été observés au contact entre la serpentinite et la diorite, surtout dans les secteurs où ne présentant pas de minéralisation massive (Figure II.11B, Leblanc and Lbouabi, 1988). Les affleurements situés à l'Est du chantier principal de Bou Azzer (entre le secteur de Taghouni et Bou Azzer centre) ont permis d'observer ce contact entre la serpentinite et la diorite quartzique, ce dernier étant systématiquement souligné par une zone très rectiligne de roche rodingitique (Figure II.9B).

La diorite présente des teintes verdâtres à bleutées dans les galeries de la mine. Une altération de type albitisation pervasive donne parfois une couleur plus claire, fréquemment en lien avec la proximité de structures minéralisées et de veines d'épidotes vertes claires (Figure II.11C et II.9D). décrit également Il est possible d'observer des minéralisations disséminées dans la matrice de la diorite (Figure II.11E).

La serpentinite est essentiellement composée de lizardite altérée en chrysotile (Annexe II.3). Deux autres types d'altérations sont observées : la carbonatation et une altération en talc (Figure II.12A). La serpentinite située au contact avec les minéralisations massives est composée de spinelles chromifères disséminées de tailles variables (Figures II.10A et II.10B, Annexe II.4). Le contact avec les minéralisations massives est marqué par un assemblage de spinelles chromifères, chlorites brunes et de veines de chrysotile (Figure II.12B, Annexe II.4). Une texture de « mesh » a été observée au microscope électronique à balayage dans les zones les plus fraîches de la serpentinite, où il est possible de distinguer des bastites (Figure II.12C). La serpentinite contient également des arséniures de Ni et de Co, observés en microscopie optique. La rammelsbergite ( $\text{NiAs}_2$ ) et la nickeline ( $\text{NiAs}$ ) sont sous forme disséminée dans le manteau serpentinisé (Figure II.12D et E) tandis que la skuttérudite semble être présente proche du contact avec les minéralisations massives (Figure II.12F). Les arséniures sont parfois fracturés et recoupés par une serpentinite (Figure II.12D et F) ce qui montre que la serpentinitisation est synchrone des premiers stades minéralisés (voir article). La cobaltite qui est un sulfo-arséniure de Co, est observée en altération sur les arséniures de Ni (Figure II.12E).

La diorite quartzique est composée de plagioclase, de quartz, de chlorite, de biotite fraîche et altérée en chlorite, d'apatite, de rares petits zircons et d'arséniures de Fe et de Co disséminés (Figure

II.13A, B, C, D, E). Des veines de calcite contenant des titanites recourent la diorite quartzique (Figure II.13E). Ces dernières ont fait l'objet de datations U-Pb LA-ICP-MS qui seront présentées dans le chapitre V. Une foliation magmatique dans la diorite est mise en évidence par les biotites (Figure II.13B).

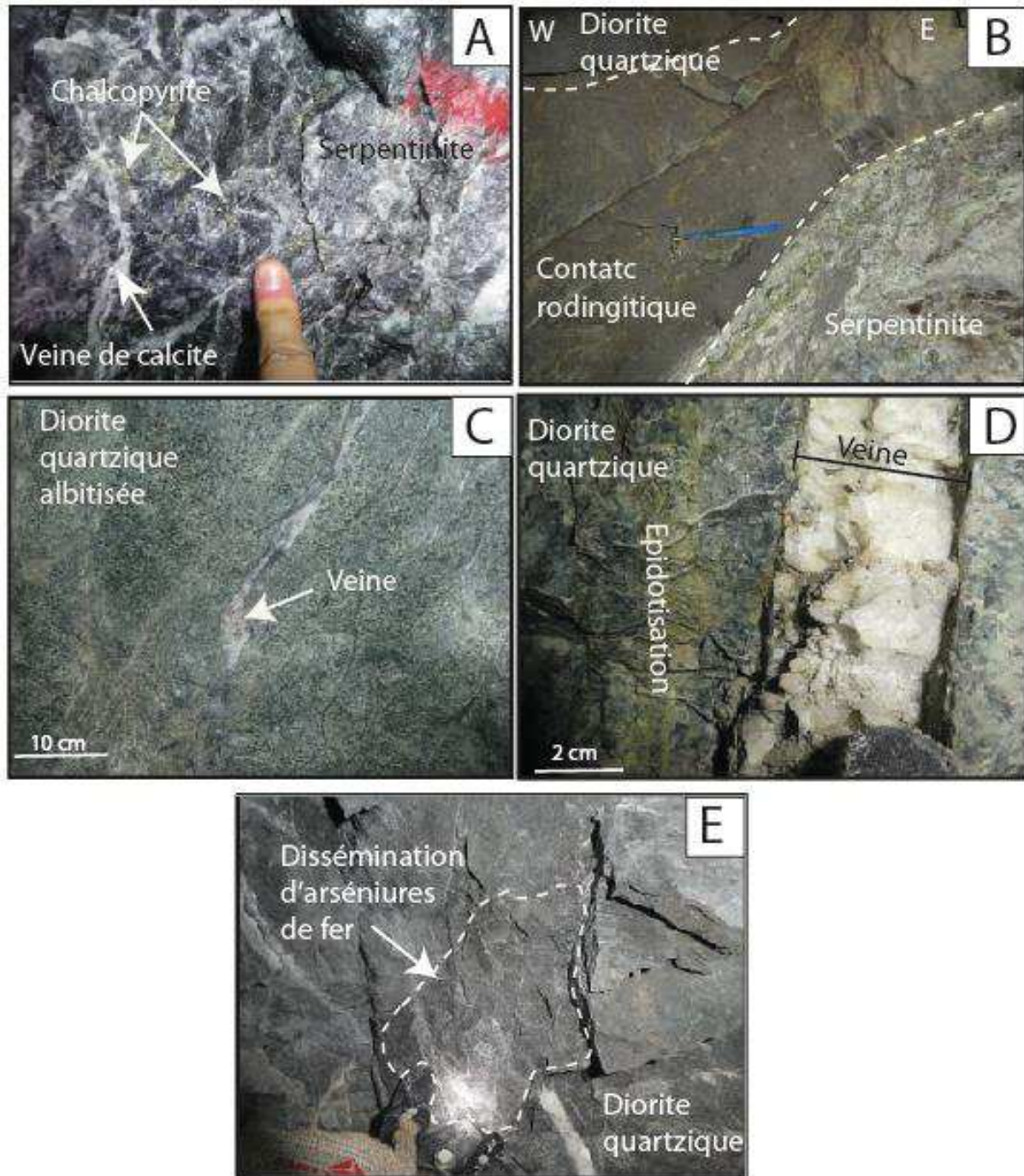


Figure II.11 : Photo en galerie des roches encaissantes des minéralisations de Bou Azzer – A) Dissémination de chalcopyrite dans la serpentinite recoupée par des veines de calcite (gisement de *Filon 53*), B) Contact rodingitique entre la diorite quartzique et la serpentinite (gisement de *Taghouni*), C) Diorite quartzique albitisée au contact des structures (gisement de *Bou Azzer puit 3*), D) Epidotisation de la diorite par des veines riches en épidote (gisement d'*Aghbar*), E) dissémination d'arséniures de Fe dans la diorite quartzique (gisement de *Bouismass*)

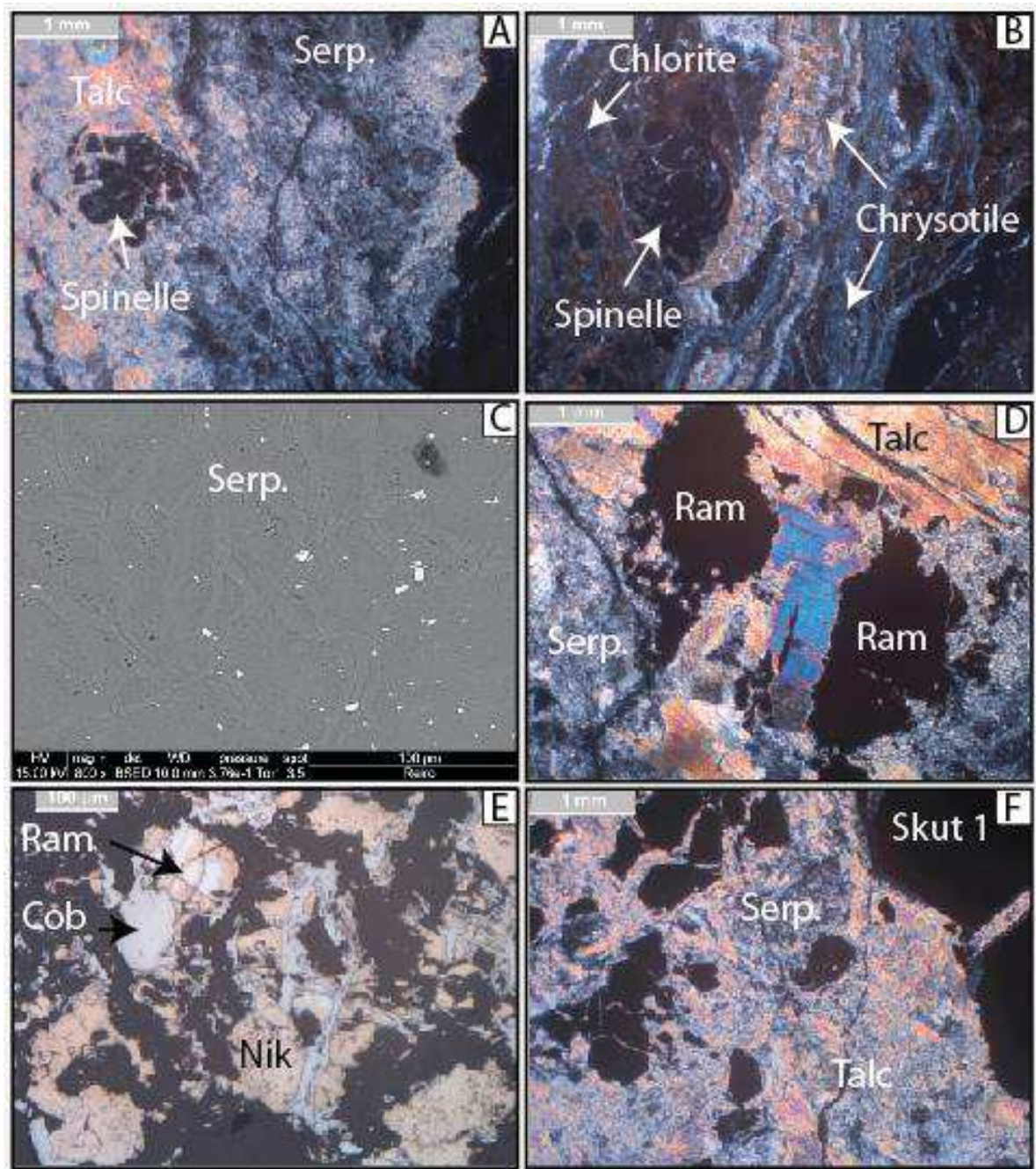


Figure II.12 : Photographie des observations microscopiques dans les serpentinites. A) Serpentinite altérée en talc et composée de spinelles chromifères (BAE46A - image en lumière polarisée - LP), B) Contact avec les minéralisations massives avec la présence de chlorite, spinelles et de veines de chrysotile (BAE 46A - LP), C) Texture de mesh des bastites dans la serpentinite (BA 23 - image MEB), D) Arséniures de Ni (rammelsbergite) disséminés dans la serpentinite et fracturés avec remplissage tardif par une serpentine en peigne, E) Présence de nickéline primaire et de cobaltite en altération sur les arséniures de Ni a été observée (BAE 46A - image en lumière réfléchie), et F) Skuttérudite 1 également fracturée par des néoformations de serpentine (BAE 46A - LP) (Abréviations : Cob : cobaltite, Nil : nickéline, Ram : rammelsbergite, Serp : serpentinite)



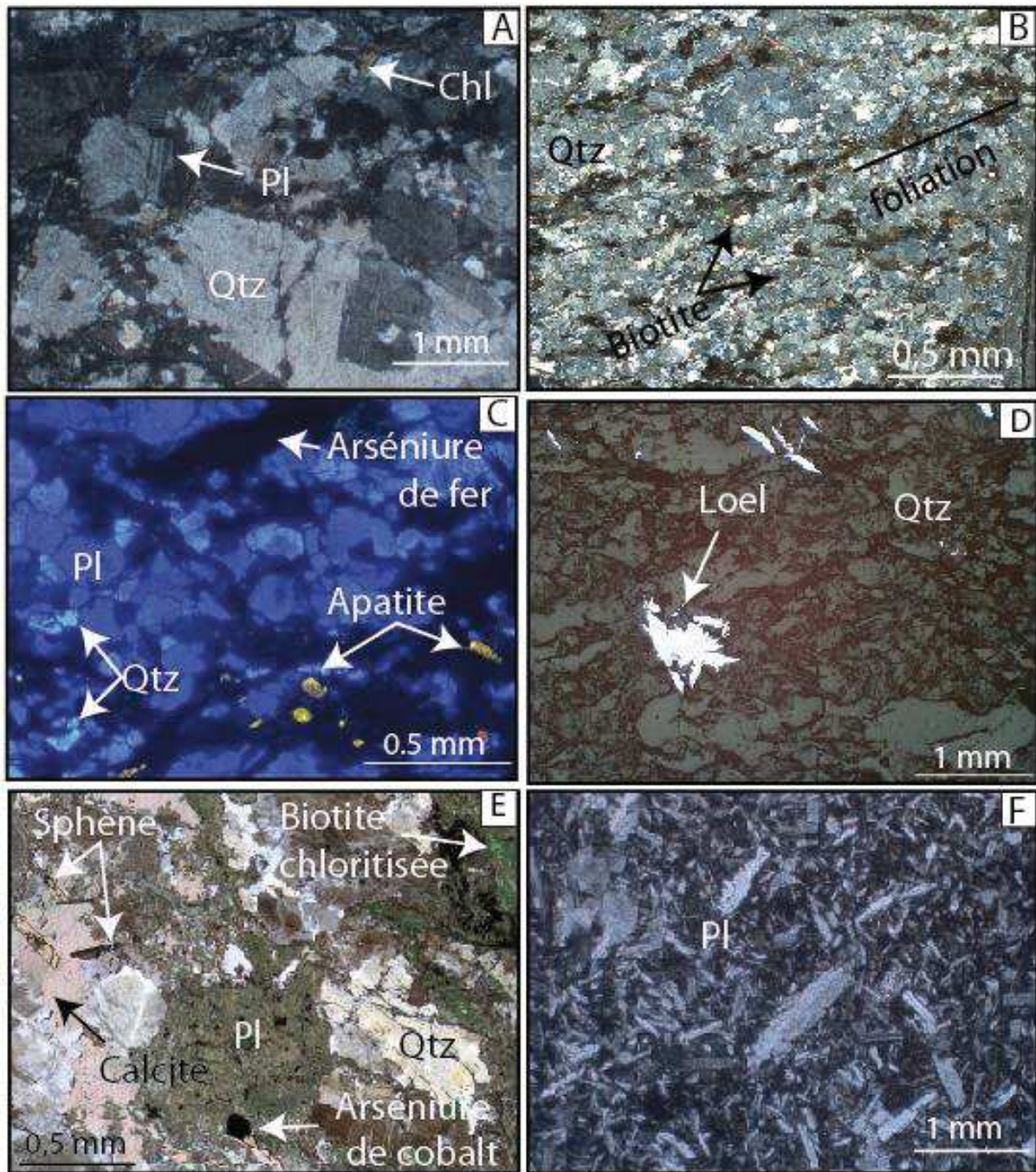


Figure II.13 : Photographie au microscope optique de la diorite quartzique de Bou Azzer. A) Diorite quartzique composée de plagioclase, de quartz (Qtz), de chlorite (Chl) (BAE20a - image en lumière polarisée - LP), B) de biotite (BAE20a - LP), C-D) d'apatites et d'arséniures de Fe disséminés (BA 8b - image en lumière réfléchie) et E) d'arséniures de Co disséminés (BAE73c1 - LP). Des veines de calcite et de titanite recourent la diorite quartzique (BAE73c1 -LP). F) la diorite quartzique fraîche montre des plagioclases automorphes (BAE1 - LP) (abréviations : Chl : chlorite, Qtz : quartz, Loel : loellingite, Pl : plagioclases)

**b) Les deux types de gisements**

**(1) Les minéralisations massives**

La structure des minéralisations massives est définie comme des lentilles de tailles variant entre 5 et 20 mètres de long et 0.5 à 7 mètres de large. Les minéralisations massives sont comprises entre la serpentinite, la diorite quartzique (Figure II.14A, C, D) et la serpentinite et les roches précambriennes volcaniques du Supergroupe de Ouarzazate (Figure II.14B). Ces structures sont composées de minéralisations massives, sous forme de lentilles (Figure II.14A et C) comprises dans deux types de gangues minérales : siliceuse et carbonatée. Les minéralisations massives montrent deux types de texture : une texture rubanée marquée par des litages d'arséniures de Ni et une texture bréchique des minéralisations massives et de la gangue carbonatée comprise dans une gangue sombre et siliceuse. L'abstract soumis à la conférence SGA présente les contraintes texturale et minéralogique de la formation des minéralisations de Bou Azzer (Annexe II.4). Les minéralisations massives décrivent deux types de textures qui sont cohérentes avec la mise en place précoce des serpentinites dans un contexte bréchique.

- i)** La texture « LMM » qui est caractérisée par l'alternance de bandes de carbonates et de nickeline ( $\text{NiAs}$ ) principalement automorphes dans la gangue carbonatée. Les LMM représentent d'anciens niveaux mylonitiques de la gangue de serpentinite (Figure II.14C, Annexe II.4).
- ii)** La texture « BMM » est caractérisée par une calcite bréchique au sein de la gangue carbonatée incluant des fragments de rammelsbergite ( $\text{NiAs}_2$ ). Les BMM sont associées à un environnement dynamique permettant la remobilisation des métaux inclus dans les spinelles et les fragments de serpentinite (Figure II.14D, Annexe II.4). Ces BMM sont associées à la formation de corps minéralisés. Selon Leblanc & Billaud (1982) ces corps minéralisés localisés le long des massifs de serpentinite sont contrôlés par des structures tectoniques (failles, zone de brèche). Ennaciri et al., (1995b) interprètent ces structures en lien avec un remplissage d'origine sédimentaire de cavités encaissés dans la serpentinite anciennement carbonatée

La deuxième gangue est composée essentiellement de quartz et de chalcopryrite visible à l'œil nu. La texture du quartz est rubanée et massive (Figure II.15A). La gangue carbonatée, qu'elle soit entre la serpentinite et les roches volcaniques précambriennes ou la diorite quartzique, présente trois types de textures : une texture automorphe où les grains de calcite automorphe sont visibles à l'œil nu (Figure II.15C), une texture rubanée avec une alternance de calcites sombres et claires (Figure II.15D) et d'aspect massif (Figure II.15E).

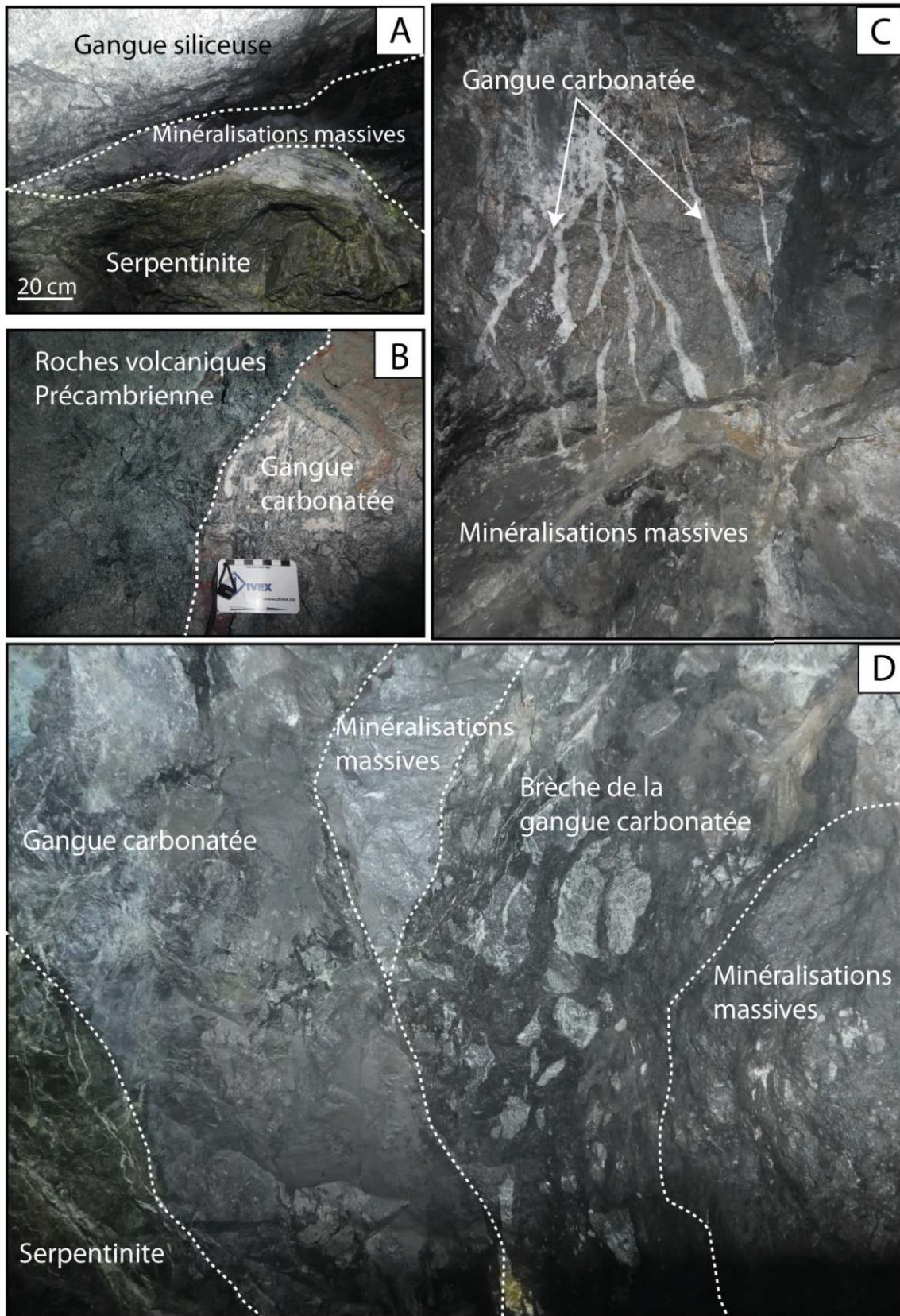


Figure II.14 : Photographie des affleurements des minéralisations massives – A) Les minéralisations massives sont composées d'une gangue siliceuse encaissant les arsénifères de Co et de Fe entre la serpentinite et la diorite quartzique et, B) d'une gangue carbonatée comprise entre la serpentinite et les roches volcaniques d'âge Précambrien. C) Les minéralisations massives montrent une texture rubanée des arsénifères de Ni comprise dans une gangue carbonatée et, D) une texture bréchique (photo d'affleurement)

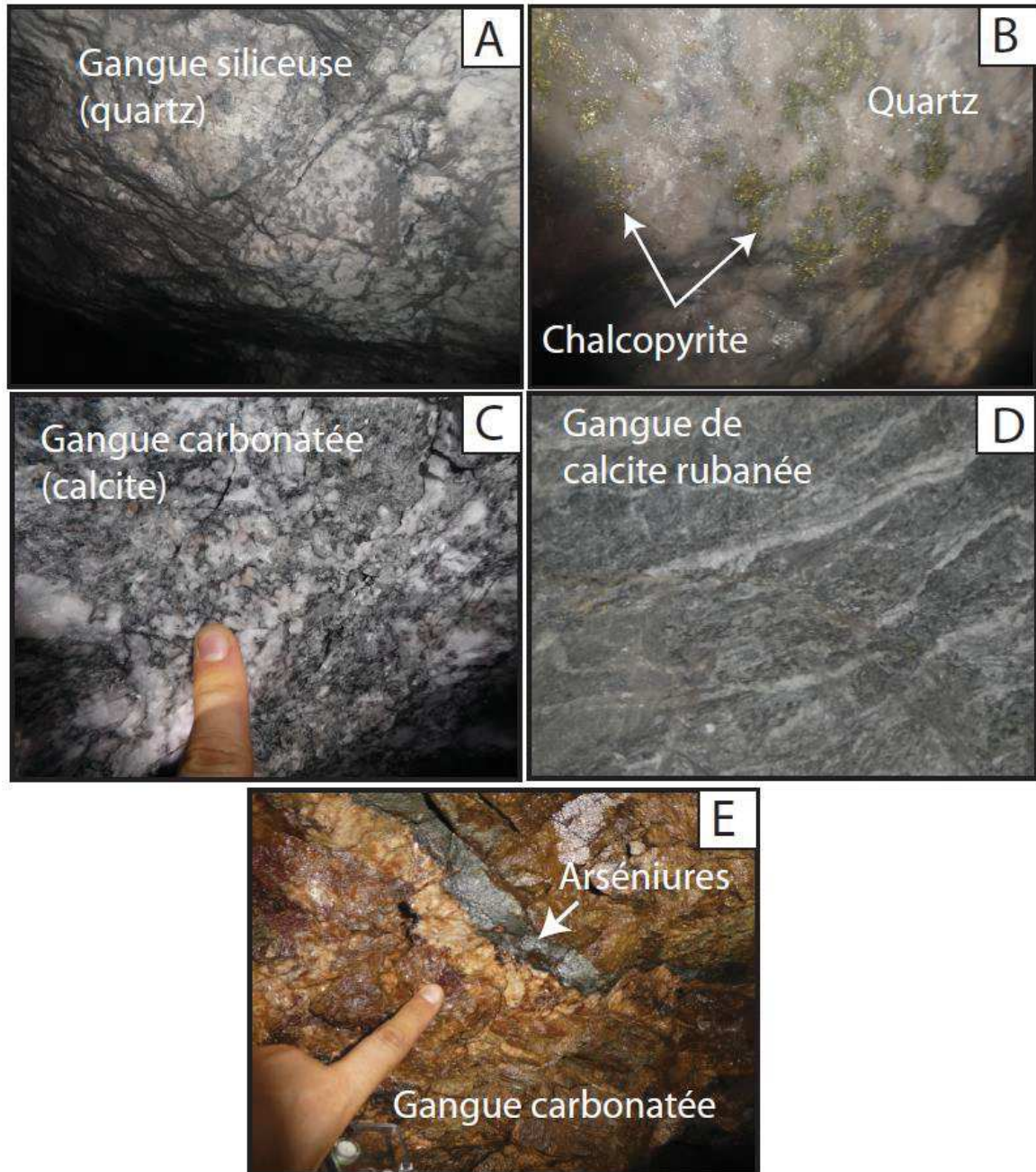


Figure II.15 : A-B) Minéralogie et texture de la deuxième gangue composée de quartz et de chalcopyrite, et C-D-E) de la gangue carbonatée montrant une texture C) automorphe, D) rubanée et E) massive (photo d’affleurement)

Les minéralisations massives débutent par le stade nickélicifère où la nickeline NiAs (Nik 1) d'aspect lamellaire se forme entourée par la rammelsbergite (Ram) et la cobaltite CoAsS (Cob 1) (Figure II.14A). Un autre type de rammelsbergite NiAs<sub>2</sub> se forme et montre deux aspects distincts : une forme massive formée autour de la nickeline à texture xénomorphe (Figure II.16A) et une forme disséminée présentant une texture bréchique à fragments isolés (Figure II.16B et II.14C). La rammelsbergite est associée à de la skuttérodite CoAs<sub>3</sub> (Skut 1) qui se présente sous forme d'étoile (Figure II.16B). Ce premier stade est riche en Ni et en arséniures bien que la formation de cobaltite et de skuttérodite indique également la présence de Co dans le système. Les quantités d'arséniures de Co sont négligeables par rapport à la nickeline et la rammelsbergite formées. Les analyses microsonde effectuées sur ces minéraux indiquent la présence de Co et de Fe au sein des arséniures de Ni observés (Annexes II.2.1 et II.2.2). La rammelsbergite contient entre 3 - 10 % poids de Co et 0,3 - 1 % pds de Fe en moyenne (Annexe II.2.1). La nickeline contient entre 800-7200 ppm de Co et 100-8200 ppm de Fe (Annexe II.2.2). Les minéralisations formées lors du stade à Ni indiquent un lien étroit avec des spinelles à auréoles de réactions riches en magnétite. Les spinelles chromifères sont inclus dans les arséniures de Ni et de Co, dont la rammelsbergite, visible sur la Figure II.17A, montrant ainsi que ces derniers minéraux se développent certainement en remplacement in-situ des spinelles de la serpentinite.

Le stade à Co est représenté par la mise en place de la skuttérodite (Skut 2) (Figure II.16B, C, D et E). La skuttérodite 2 représente le minéral le plus exploité et se forme massivement à ce stade comparé à la formation des autres minéraux. Cet arséniure de Co montre des textures automorphes hexagonales se formant sur les bords des brèches de rammelsbergite (Figure II.17B et C). Cette skuttérodite (Skut 2) décrit des bandes de croissances remarquables qui traduisent des différences chimiques entre les éléments Ni et Co (Figure II.15C). Des textures d'alternance entre la skut 2 automorphe et la calcite de la gangue carbonatée (Calc 2) sont observées (Figure II.17C). La safflorite (Saf1), qui est un arséniure de Co, se forme lors du même stade minéralisateur. Sa composition CoAs<sub>2</sub>, lui permet de se développer sur les bords de la rammelsbergite dont la formule structurale est NiAs<sub>2</sub> (Figure II.17D). Toutefois, le potentiel économique de ce stade à Co semble essentiellement représenté par la skuttérodite (Skut 2).

La mise en place de la gangue carbonatée (Calc 2) se déroule à la fin du stade à Co des minéralisations massives (Figure II.16C). La gangue carbonatée est composée de calcite et de reliques de spinelles chromifères (Figure II.17A, Annexe II.4), de quelques arséniures disséminés associés à des fractures de chlorite (Figure II.18B). Dans le détail, la gangue carbonatée est constituée de deux générations de calcite définies par leur texture et leur association avec les minéralisations. La calcite 2 est définie par une calcite associée à la fin du stade à Co (Calc 2.1 – Figure II.17C) et une calcite massive (Calc 2.2) montrant différents types de textures : bréchique, rhomboédrique (Figure II.18B)

et même des fantômes de texture de « mesh » caractéristiques de la serpentinisation (Figure II.18C). Cette observation démontre que les carbonates se développent certainement au profit d'une roche serpentinisée. Par endroit, la gangue carbonatée est affectée par une intense fracturation (Figure II.16F) peut-être en lien avec la mise en place d'une autre structure.

Le stade riche en Fe se met en place principalement avec l'arrivée de la loellingite (Loel 1) mise en place sur les bords de la skuttérodite (Figure II.17C) ou de la safflorite (Figure II.19A). Des textures de cristallisation synchrones entre la calcite (Calc 2.2) et la loellingite ont été observées, impliquant une relation proche entre le stade à Co et à Fe (Figure II.19A). La formule structurale de la loellingite est  $FeAs_2$ . La formation ou le remplacement du Co par le Fe se fera plus facilement au dépend de la safflorite, dont la formule est  $CoAs_2$ .

Le stade à sulfure évoqué dans l'étude pétro-structurale ci-dessus est caractérisé par la présence de sphalérite (Figure II.19B), de chalcopryrite (Figure II.16B), de millérite (Figure II.19C) et d'arsénopyrite disséminés. La sphalérite peut fracturer la nickeline lors de sa mise en place (Figure II.19B). La millérite (NiS) indique la persistance de la présence de Ni lors des derniers stades de formation des minéralisations massives.

La gangue siliceuse, plus rare, est essentiellement composée de grains de quartz de taille millimétrique et de forme irrégulière, recoupée parfois de veines tardives à quartz et à chlorite. Le quartz montre des textures subautomorphes en mosaïque (Figure II.19D).

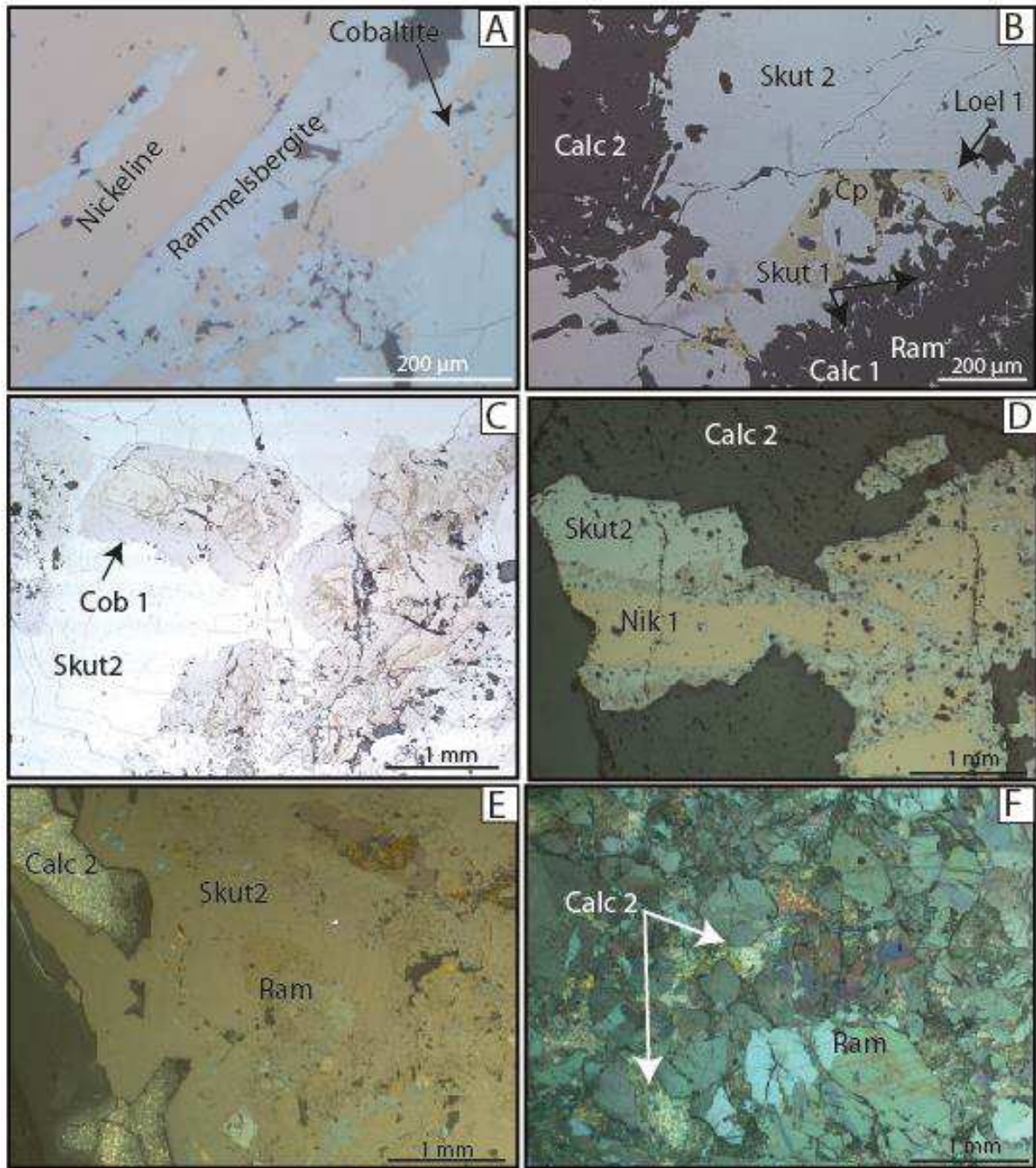


Figure II.16 : A) Nickeline (Nik 1) lamellaire entourée de rammelsbergite (Ram). La cobaltite (Cob 1) se met en place après la rammelsbergite. B) Fragments de rammelsbergite compris dans de la calcite (Calc 1), suivis de skutterudite (Skut 1), puis de cobaltite (Cob 1). L'arrivée de la skutterudite (Skut 2) automorphe et massive se poursuit par la mise en place de la gangue carbonatée (Calc 2.2). C) Nickeline lamellaire entourée de skutterudite et de la gangue carbonatée (Calc 2.2). D-E) fragments de rammelsbergite dans une gangue massive de skutterudite. F) Rammelsbergite fracturée par la gangue carbonatée. Toutes les photographies sont en lumière réfléchie

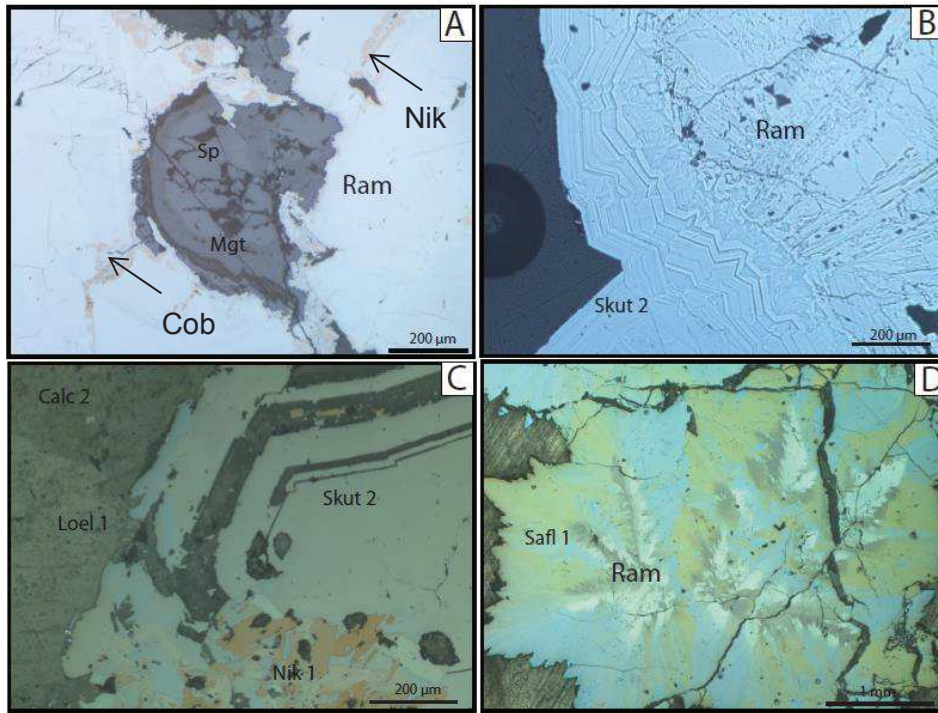


Figure II.17 : A) Spinelles chromifères à auréole de magnétite. La nickeline (Nik 2) et la cobaltite (Cob 2) secondaire sont également observées en bordures de cristaux de rammelsbergite. B) Texture en plume et hexagonale de la skuttérodite. C) Skuttérodite hexagonale montrant des textures d’alternance de cristallisation entre la Skut 2 et la calcite 2.1 de la gangue carbonatée. D) Rammelsbergite à texture en plume entourée de safflorite à texture étoilée. Toutes les images sont en lumière réfléchie

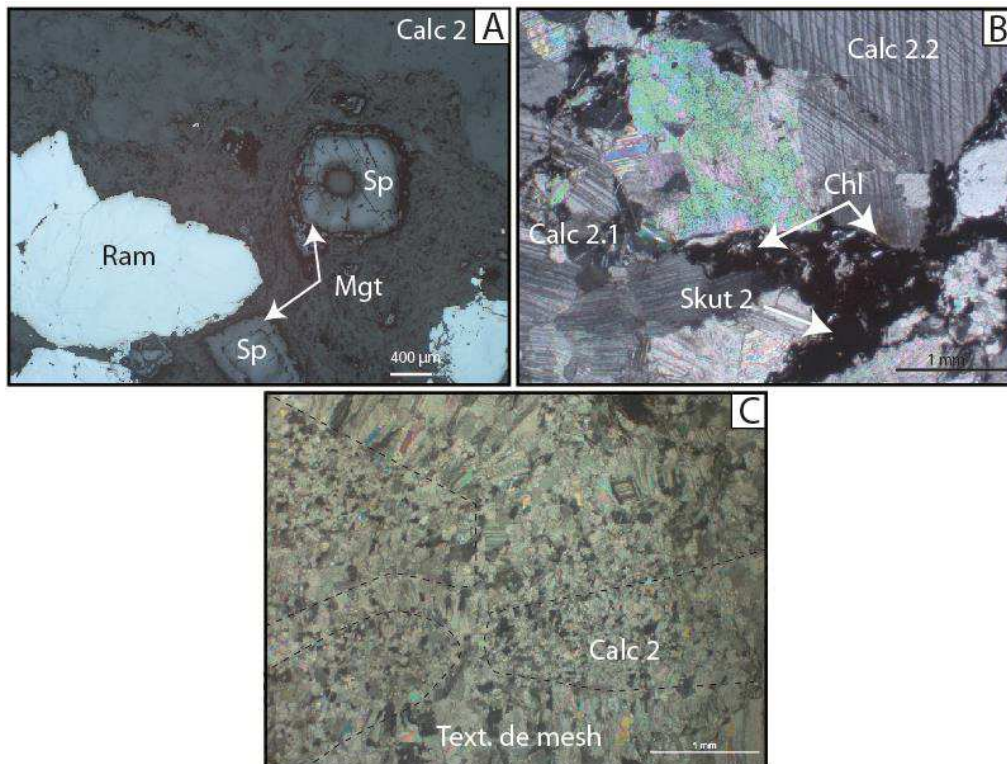


Figure II.18 : Gangue carbonatée composée : A) de reliques de spinelles (image en lumière réfléchie), B) de calcite à deux textures : bréchiqes, rhomboédrique, C) de texture fantôme de mesh (B et C prises au microscope optique en lumière polarisée)



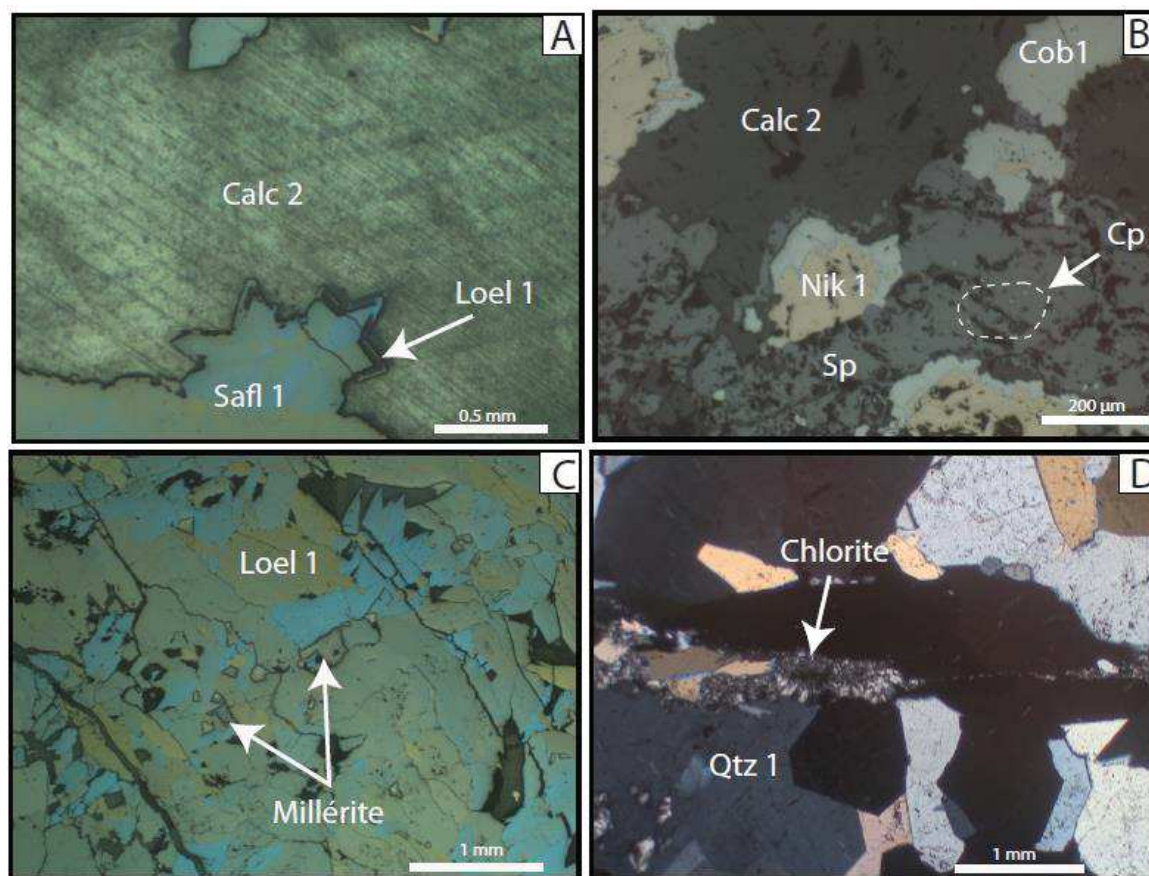


Figure II.19 : Gangue carbonatée formée au début A) du stade à Fe représenté par la mise en place de la loellingite et des carbonates autour de la safflorite, B) du stade à sulfures où la sphalérite et la chalcoppyrite se forment. C) Exemple de millérite observée lors des stades tardifs à Fe (images en lumière réfléchie). D) Exemple de gangue siliceuse composée de quartz à texture en mosaïque associée à des veines tardives à chlorite (image en lumière polarisée)

## (2) Les veines et les poches

Structuralement, les veines minéralisées en arséniures de Co et de Fe recoupent systématiquement les minéralisations massives. Les veines ont des textures qui indiquent une mise en place en ouverture à travers la diorite quartzique principalement (Figure II.20A à E). Lorsque les veines minéralisées s'éloignent des minéralisations massives, leur taille diminue ainsi que leur teneur en métaux (Figure II.20F). La même paragenèse est observée dans l'ensemble des veines, mais les minéraux illustrent des textures différentes.

- Le quartz (Qtz 2) se décline sous plusieurs formes. Il peut être rubané et alors de couleur claire et transparente (Figure II.20A), de couleur plus sombre au bord des structures et alors souvent en peigne (Figure II.20B), et parfois en matrice de brèches à fragment de diorite et de minéralisations (Figure II.20C et D).
- Les arséniures de Co et de Fe montrent cinq textures différentes : i) une texture rubanée associée à la formation du quartz (Figure II.20A), ii) une texture massive poursuivant la formation du quartz, iii) une texture en cocarde autour des brèches de diorite quartzique (Figure II.20C), iv) une texture de remplissage associée au quartz et encaissant les brèches de

diorite quartzique (Figure II.20D) et v) une texture particulière définie par des formes en étoile dans la gangue de calcite (Figure II.20E).

- Deux générations de carbonates sont observées dans les veines minéralisées: de la dolomite rose massive tardive par rapport aux arséniures (Dol 1 - Figure II.20B) et de la calcite automorphe de couleur blanche (Figure II.20A, II.18C, II.18E et II.18F) et jaune (Figure II.20D) (Calc 4). La calcite 3 définie comme étant synchronique de la dolomite, n'a pas été observée à l'échelle de l'affleurement mais uniquement en lame mince.

Les veines présentées ci-dessus se rencontrent à la fois au cœur de la diorite quartzique et des minéralisations massives (Figure II.21E et II.19F). Dans les deux cas, elles ont la même composition minéralogique globale et les mêmes assemblages minéralogiques à savoir : quartz en bordure et arséniures et calcite au centre.

Les poches sont des structures dont la minéralogie est proche de celle des veines. Texturalement, les poches sont des géodes en ouverture caractérisées par des minéraux automorphes. Les poches peuvent se rencontrer au sein de la diorite mais surtout au cœur des minéralisations massives. La séquence de remplissage débute par des quartz en peigne automorphes pluridécimétriques (Qtz 2) associés à des arséniures observés entre les peignes de quartz (Figure II.21A et B). De larges cristaux de calcite automorphes et rhomboédriques constituent le remplissage principal des géodes. La calcite peut inclure des fragments de diorite associés à des arséniures (Figure II.21C) mais également des fragments uniquement composés d'arséniures (Figure II.21A). Des géodes stériles en minéralisations sont également observées au sein de la gangue des minéralisations massives (Figure II.21D).

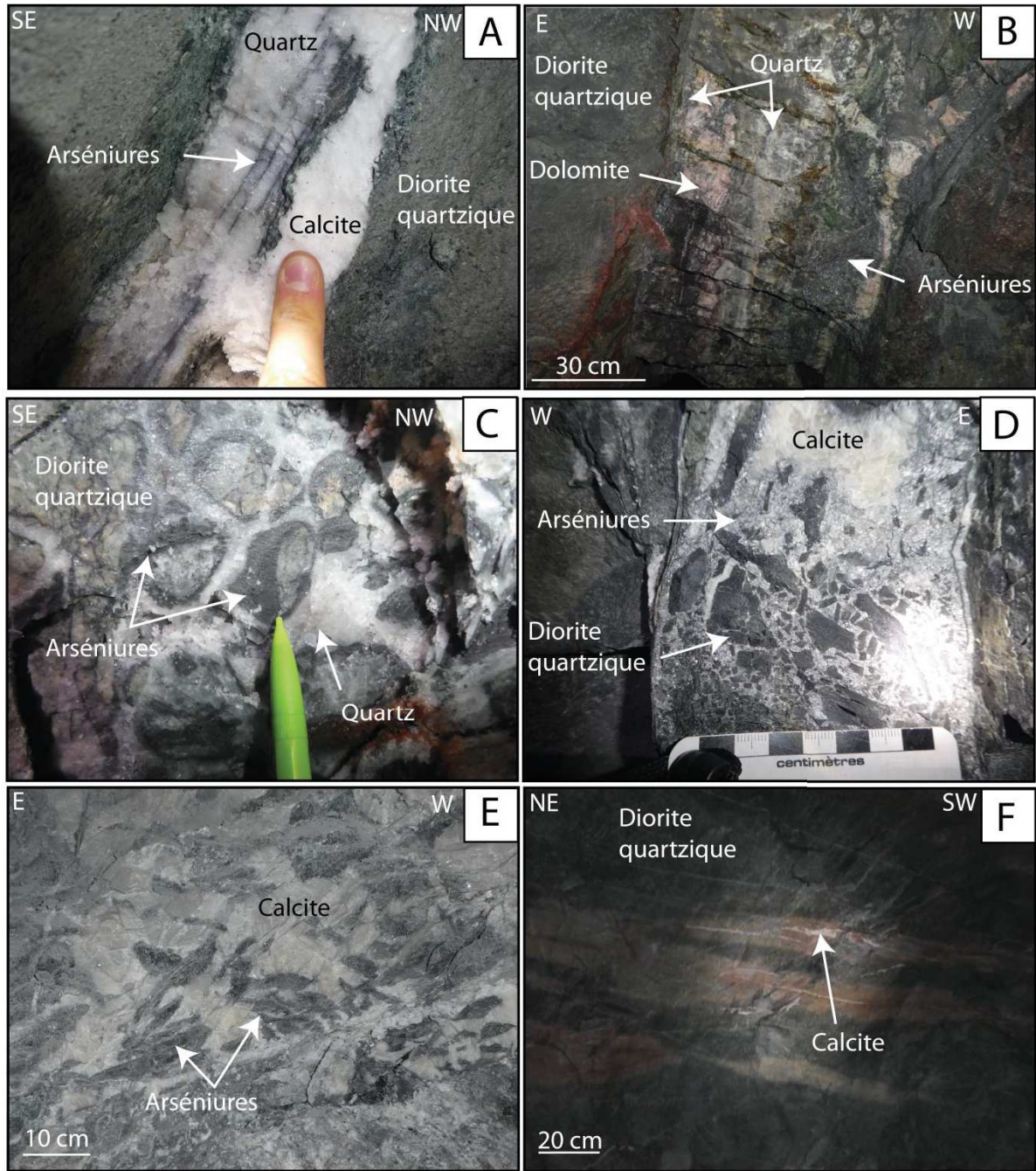


Figure II.20 : A) Veine recoupant la diorite quartzique et composée de quartz clair à texture rubanée associé à des arséniures. La calcite tardive se met en place par la suite. B) Veines de quartz, d'arséniures massifs et de dolomite rose recoupant la diorite quartzique. C) Brèche cocarde minéralisée en arséniures autour de fragments de diorite, dans une gangue à quartz et calcite. D) Brèches à fragments de diorite dans une matrice d'arséniures, de quartz et de calcite jaune tardive. E) Arséniures montrant une texture en forme d'étoiles ou de lamelles dans la calcite. F) Veines stériles composées principalement de calcite et montrant une auréole d'altération rouge affectant la diorite encaissante (photo en galerie)



Figure II.21 : A) Poche géodique composée de quartz automorphe en peigne associé à des arséniures, de la calcite rhomboédrique qui comble l'espace restant et entraîne avec elle des fragments d'arséniures, B) Poche à quartz, arséniures et calcite dans la diorite quartzique. C) Fragment de diorite entouré d'arséniures au sein de la poche. D) Géode observée dans la gangue carbonatée des minéralisations du site minier de Tamdrost. E) Veines de calcite et de quartz à arséniures au centre de la veine, recoupant la gangue carbonatée des minéralisations massives. F) Veines recoupant la gangue carbonatée d'une minéralisation massive

Les paragenèses des minéralisations des veines et des poches sont très proches, ce qui nous a permis de considérer ces deux objets dans le même stade. Dans les veines, la paragenèse débute avec la mise en place du quartz 2 et de dolomite 1 associée à de la calcite 1 avant la mise en place des arséniures de cobalt et de Fe (Figure II.22A). La dolomite est de couleur sombre difficile à discerner de la calcite 1 au microscope, la cathodoluminescence a permis de bien discriminer ces deux

carbonates. La formation du quartz, à texture en peigne est associée à la skuttérodite 3. Cet arséniate de cobalt ne montre pas de texture particulière et se forme entre les peignes de quartz (Figure II.22B) de façon automorphe en hexagone dans les veines (Figure II.22C).

Les structures de poche géodique expriment la même paragenèse à partir de la mise en place du quartz 2 à texture en peigne pluridécimétrique associé à des arsénies visibles entre les peignes (Figure II.22E). La gangue de calcite rhomboédrique comble également le vide comme observée sur la Figure II.22E. L'arrivée du stade à Fe est marquée par le remplacement de la skuttérodite 3 par la loellingite (Loel 2 - Figure II.22D). La loellingite apparaît sous forme de texture étoilée où des bandes de croissance sont marquées par des variations de Co et de Fe (Figure II.22F). Cet arséniate de Fe représente le stade à Fe se mettant en place avec l'arrivée de la calcite massive, rhomboédrique (Calc 4) (Figure II.22D, Figure II.23A et II.21B). Enfin, le stade à sulfures est également exprimé le long des arsénies de Fe (Loel 2) par la mise en place dans la gangue carbonatée (Calc 4) de l'arsénopyrite et de la chalcopryrite. La chalcopryrite montre une texture soit disséminée soit massive. Le long des bordures de loellingite et dans la gangue carbonatée ont été observés de la bornite et des cuivres gris (tennantite - tétrahédrite). Les fragments de loellingite sont englobés dans une gangue de carbonate ou de quartz, fracturés par une calcite tardive apparaissent au sein des poches. Cette dernière paragenèse de calcite stérile (Calc 5) est observée dans les veines lorsqu'elles recoupent la diorite quartzique. Ces calcites sont associées à de l'adulaire (Adu), formée le long des plagioclases et de quartz (Qtz 3).

Les veines et les poches décrivent des textures de remplissage similaires que l'on peut résumer ainsi : i) des clastes de diorite enveloppés par des arsénies de cobalt en bordures et compris dans une matrice de quartz à texture en peigne (Figure II.24A) et plumeuse à ondulation (Figure II.33B) ; ii) des clastes de diorite enveloppés d'arsénies de Fe (Figure II.24C) dans une matrice de calcite (Figure II.24C) ; iii) des textures automorphes des minéraux de gangues de taille pluridécimétrique au sein des poches (Figure II.33E). Les carbonates compris au sein des poches et des veines ont été séparés en deux générations : une calcite bréchique (Calc 4.1) et une calcite automorphe englobant les calcites bréchifiées (Calc 4.2) (Figure II.24E).

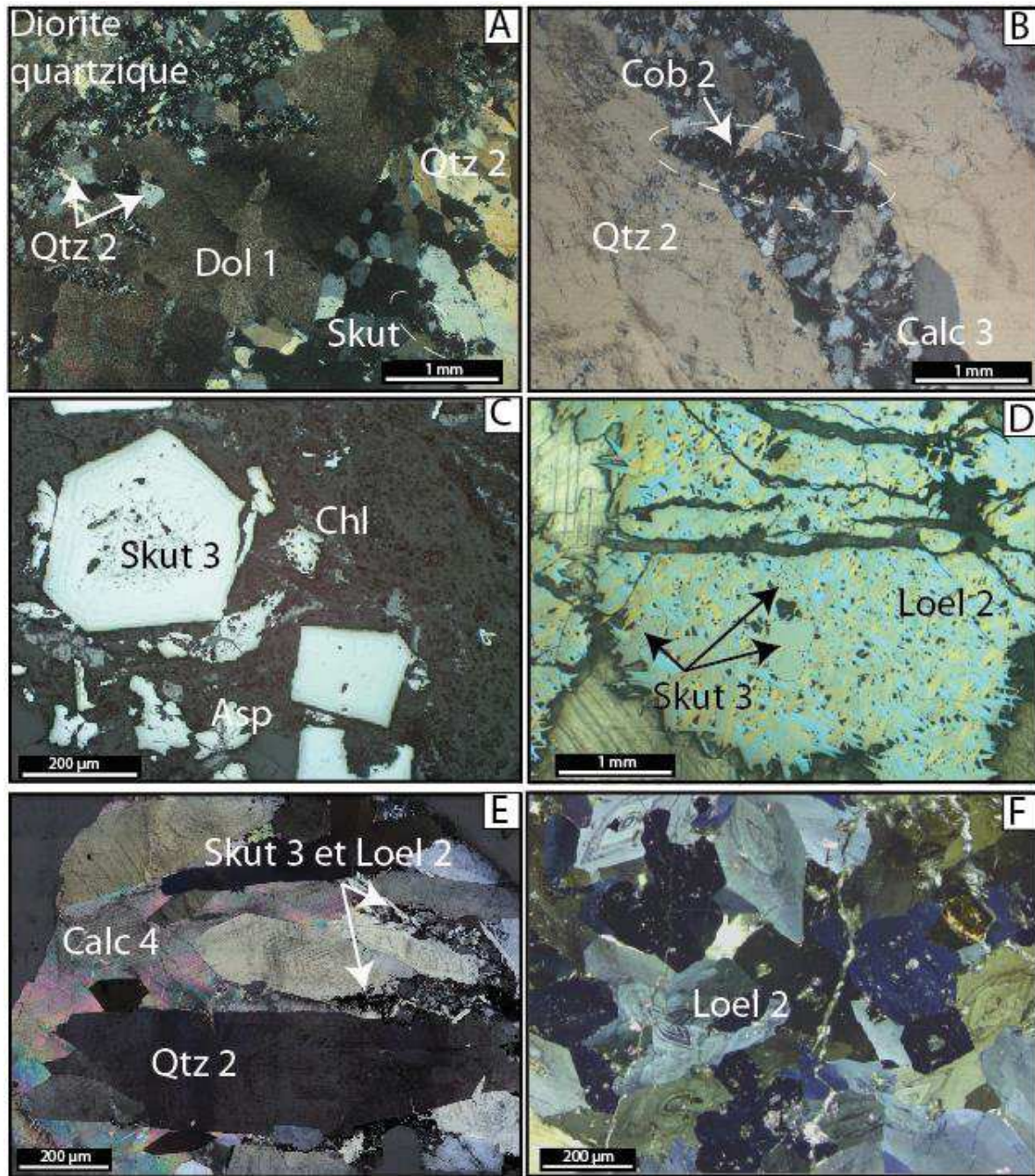


Figure II.22 : A) Dolomite (Dol1) et calcite (Calc 3) se formant avant la mise en place des arséniures de Co et de Fe ; le quartz en peigne (Qtz 2) remplit les espaces disponibles. B) Quartz (Qtz 2) associé aux minéralisations de skuttérudite (Skut 3). C) Skuttérudite (Skut 3) montrant une texture automorphe hexagonale dans les veines ; l'arsénopyrite est contemporaine de la mise en place des carbonates. D) Skuttérudite au cœur d'une texture massive ; la loellingite à texture étoilée se forme sur la skuttérudite ou en remplacement. E) Vue de la texture des poches composées de quartz (Qtz 2) en peigne, de calcite (Calc 4) comblant le vide et apparaissant avec une texture rhomboédrique et automorphe ; la skuttérudite et la loellingite se trouvent entre les grands grains en peigne de quartz. F) Loellingite (Loel 2) en texture étoilée et montrant des bandes de croissance

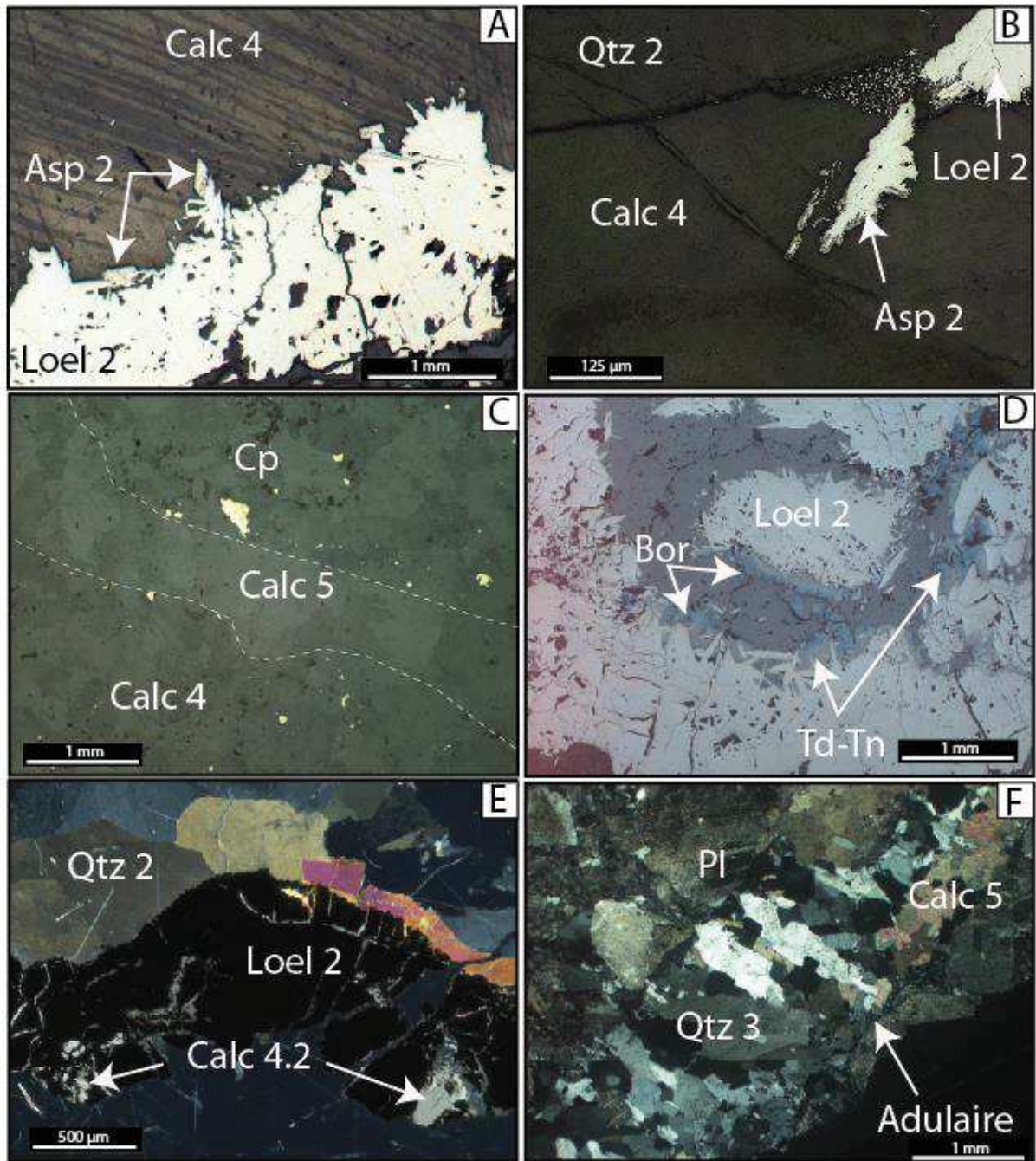


Figure II.23 : A-B) Position de l'arsénopyrite (Asp 2) dans la gangue carbonatée (Calc 4) et sur les bords de la loellingite (Loel 2). C) Gangue carbonatée comprenant de la chalcopyrite (Cp) et recoupée par une veine de calcite stérile (Calc 5). D) Bornite (Bor) et cuivres gris (Td-Tn) tardifs se formant dans la gangue carbonatée et sur les bords de la loellingite (Loel 2). E) Fragment d'arséniures de Fe essentiellement composé de loellingite et recoupé par du quartz (Qtz 2) et de la calcite (Calc 5). F) Veines tardives stériles en métaux mais composées d'adulaire (Adu) sur les bords des plagioclases, de quartz (Qtz 3) et de calcite (Calc 5)

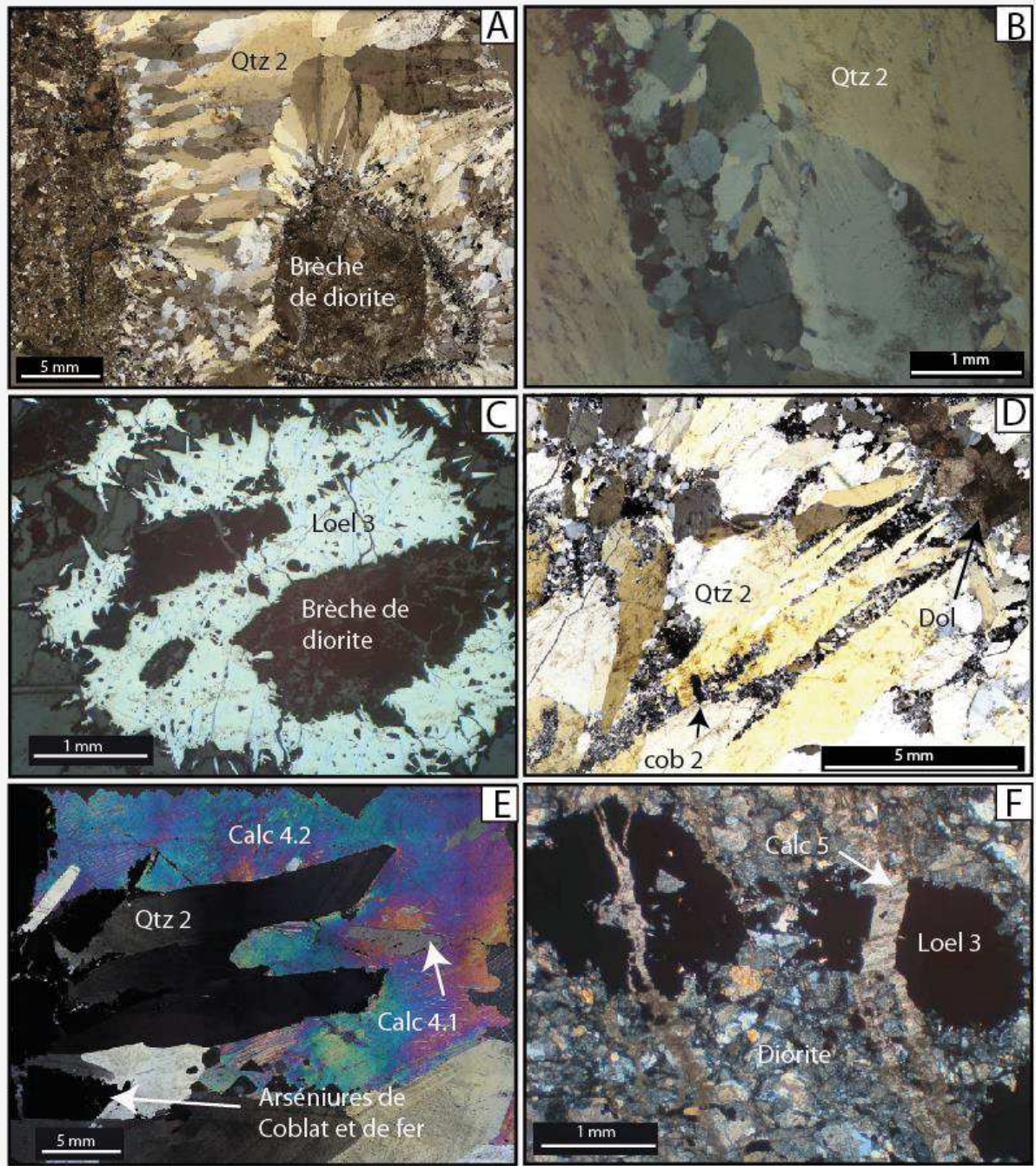


Figure II.24 : A) Brèche à fragments de diorite quartzique entourés d'arséniures et de quartz en peigne (Qtz 2). B) Texture en plume et onduleuse du quartz 2. C) Brèche à fragments de diorite entourés de loellingite dans une gangue de calcite (image en lumière réfléchie). D) Quartz en peigne (Qtz 2) associé à de la cobaltite (Cob 3), E) Quartz en peigne (Qtz 2) et calcite (Calc 4) automorphes dans les poches, la calcite montre deux textures : une texture bréchique (Calc 4.1) et rhomboédrique (Calc 4.2), F) Fracturation par la calcite tardive (Calc 5) des loellingite (Loel 1) incluses dans la diorite quartzique



### 3. Altération

Différents processus d'altération ont affecté les roches encaissantes ou les minéraux en lien avec la mise en place des minéralisations de Co et de Ni de Bou Azzer. Ces altérations sont visibles à de multiples échelles de la surface jusqu'en galerie, de l'échelle de l'affleurement à la lame mince. La serpentinite, qu'elle soit en surface ou en galerie, montre une altération en talc donnant une couleur blanchâtre de la serpentinite (Figure II.25A et B) et en carbonate mis en évidence par des veines de calcite la recoupant et un remplacement de la serpentinite par la calcite (Figure II.25C).

La diorite quartzique a subi plusieurs altérations traduites par la formation de titanite, une altération en albite également observée par Leblanc (1975), une chloritisation et une épidotisation. Ces dernières traduisent une altération Na-Ca qui pourra être comparé à la nature du fluide (cf. Chap. III). La couleur des chlorites est bleutée à verte selon l'intensité de l'altération. La diorite montre une altération à épidosite (Figure II.25D). Les minéralisations massives étudiées dans le site minier de *Tamdrost* montrent la présence d'une altération supergène qui se traduit par une altération des quartz visibles par la formation d'oxydes de Fe (hématite) (Figure II.25E). Les veines minéralisées altèrent également la diorite encaissante qui montre un halo systématique de couleur rougeâtre (Figure II.25F).

Les minéralisations massives décrivent également des processus d'altération à l'échelle de la lame mince. Les arséniures de Co subissent une altération supergène décrite par Leblanc (1975), en érythrine, bien visible par la couleur rose vif du minéral (Figure II.21A). La formation de nickeline et de cobaltite secondaire a été observée sur les bords de rammelsbergite (Figure II.26B et II.21D) fracturée par la formation d'une serpentinite (Figure II.26C) ou de la gangue carbonatée (Figure II.26D). L'arsénopyrite vient également se former sur la skuttérudite ou la loellingite (Figure II.26E).

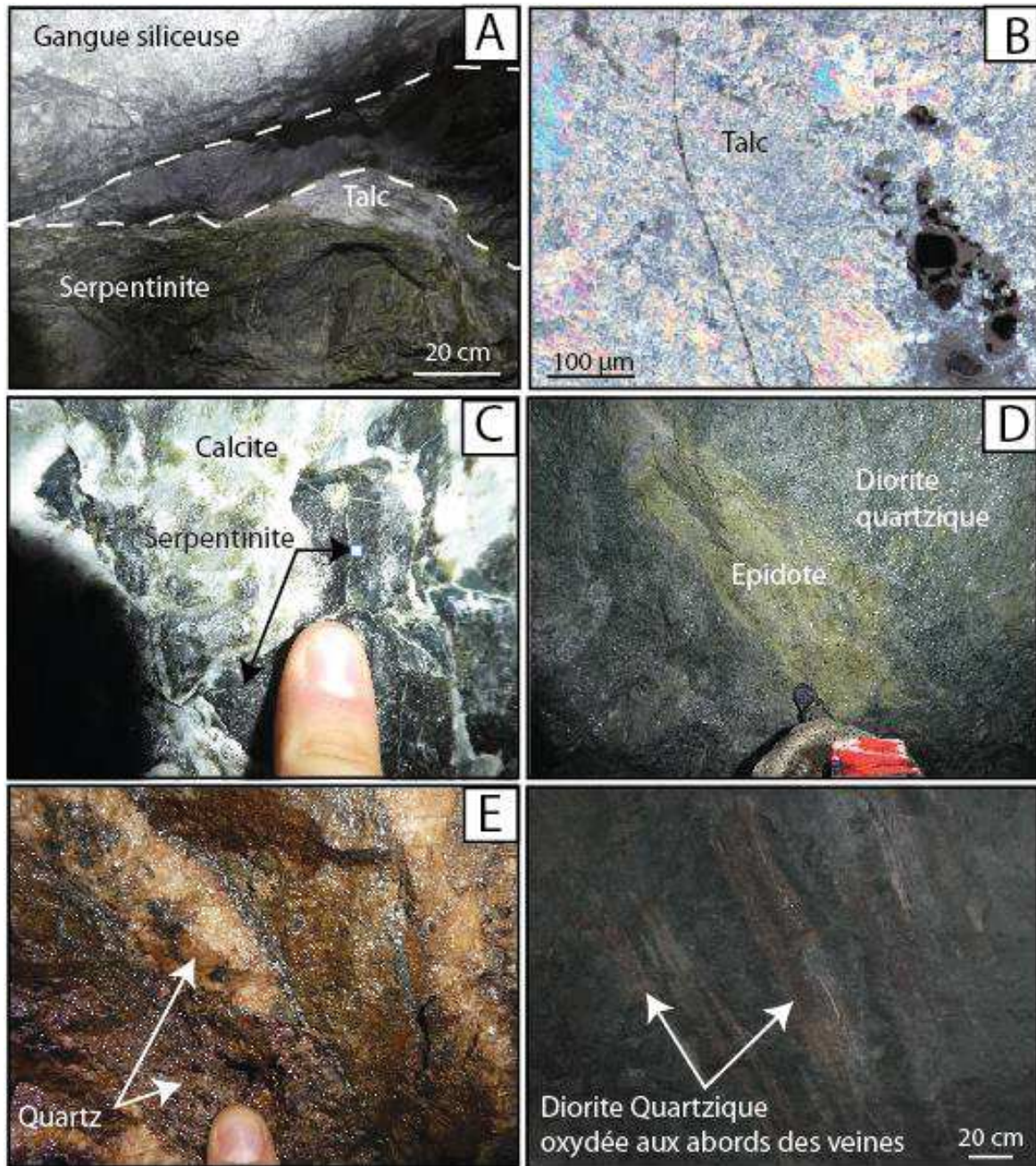


Figure II.25 : A) Altération en talc observée dans la serpentinite près du contact avec les minéralisations massives. B) Altération en talc observée en lame mince (image en lumière polarisée). C) Carbonatation de la serpentinite. D) Altération à épidosite de la diorite sous la forme de zones disséminées ou de veines. E) Oxydation par un fluide supergène de la gangue siliceuse des minéralisations massives. F) Altération rougeâtre aux abords des veines minéralisées dans la diorite quartzique

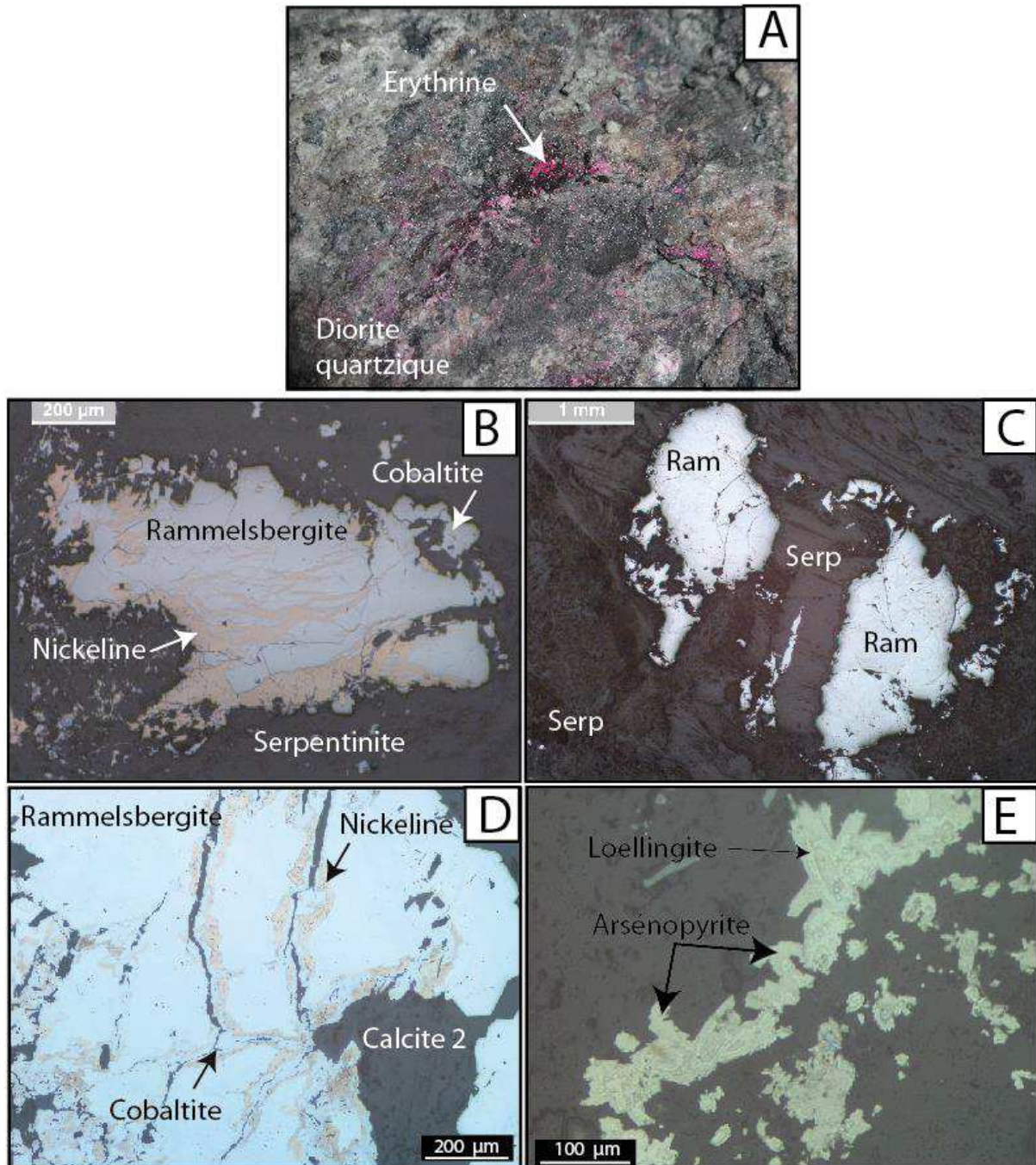


Figure II.26 : A) Altération des arséniures de Co en érythrine par altération supergène décrite par Leblanc (1975). B) Remplacement de la rammelsbergite par de la nickéline. C) Fracturation de la rammelsbergite par une serpentinite et remplacement par de la nickéline secondaire. D) Fracturation de la rammelsbergite par la formation de la gangue carbonatée et mise en place de nickéline puis de cobaltite sur les bordures. E) Remplacement, parallèlement aux bandes de croissance, de la loellingite (de couleur beige claires) par de l'arsénoopyrite

Ce qu'il faut retenir :

Deux types de minéralisation sont exploités au district cobaltifère et nickélifère de Bou Azzer :

1) **Les minéralisations massives**, orientée N120°E sous formes de lentilles et sont essentiellement enrichies en arséniures de Ni et de Co

2) **Les veines minéralisées** en arséniures de Co et de Fe uniquement lorsqu'elles recoupent les minéralisations massives. Les minéralisations sont encaissées dans une gangue siliceuse et carbonatée et sont systématiquement localisées au contact entre la serpentinite, la diorite quartzique et les roches volcaniques précambriennes. Les veines décrivent des textures d'un système formé en ouverture. Elles sont orientées N/S à N70°, décrivent dans le plan vertical un jeu systématiquement normal, avec des composantes sénestres et dextres dans le plan horizontal, cohérentes avec une direction de raccourcissement N°30. Des structures géodiques (appelées poches) montrent les mêmes paragenèses et textures que les veines.

Les deux types de gisement montrent **une évolution paragenétique évoluant de phases minérales riches en Ni-(Co-Fe) à des fluides riches en co-(Ni-Fe)** depuis les minéralisations massives jusqu'aux veines. La mise en place de la nickeline (NiAs) suivie de la rammelsbergite (NiAs<sub>2</sub>) représente le premier stade à Ni uniquement observé dans les minéralisations massives et dans la serpentinite. Le stade à Co est commun aux veines et aux minéralisations massives par la mise en place de la skuttérudite ((Co,Ni)As<sub>3</sub>) (minéral le plus exploité à Bou Azzer) et de la safflorite ((Co,Fe,Ni)As<sub>2</sub>). La gangue carbonatée se met en place à la fin du stade à Co. Ensuite, le stade à Fe est représenté par la formation de la loellingite (FeAs<sub>2</sub>) qui se forme sur la safflorite synchrone de la formation de la gangue carbonatée. Enfin, le stade à sulfures apparaît avec la formation de la cobaltite (CoAsS), de l'arsénopyrite (FeAsS) et de sulfures à métaux de base (chalcopyrite (CuFeS<sub>2</sub>), sphalérite (ZnS) et galène (PbS)).

La gangue carbonatée joue **un rôle important** dans la compréhension de la mise en place pétro-structurale des minéralisations. Nous avons observé qu'elle était composée de **fragments de serpentinite**, des reliques de **spinelle**, d'une texture laminée sous formes de couche alternant entre des nickélines et de la calcite rhomboédrique et d'une texture bréchique. La formation des arséniures de Ni et de Co débute par le processus de remplacement in-situ de spinelles disséminés dans une gangue de serpentinite. L'environnement précoce de mise en place des minéralisations était un contact bréchique composé de fragments de serpentinite et de reliques de spinelles disséminés ou sous forme de lits. Ce contact bréchique faciliterait la circulation de fluide, le **lessivage des serpentinites** et des **spinelles** enrichis en As, Co, Ni pour les **remobiliser sur place**, le **long de détachement** à faible pendage.

Des questions demeurent sur la position géodynamique de la boutonnière de Bou Azzer, est-ce réellement la zone de suture de l'orogénèse Panafricaine ? Les différents résultats obtenus à l'échelle de la boutonnière et des minéralisations vont dans le sens d'une exhumation des roches ultramafiques de Bou Azzer :

- Plusieurs contacts en faille normale montrent un environnement bréchique de mise en place le long de détachements à faible pendage.
- Cet aspect bréchique de la serpentinite au contact avec les carapaces, les roches mafiques ou la diorite quartzique est soutenu par l'intensification de la foliation et de la carbonatation de la serpentinite.
- Une forme en dôme du massif de serpentinite de Bou Azzer est observée du nord au sud de la boutonnière. Des pendages à vergence nord sont décrits au nord et des pendages sud sont décrits au sud.
- Les minéralisations massives décrivent deux types de textures qui sont cohérentes avec la mise en place précoce des serpentinites dans un contexte bréchique : les textures Bréchifiées des Minéralisations Massives (BMM) et Laminée des Minéralisations Massives (LMM). Les BMM décrivent un environnement dynamique permettant le processus de remobilisation des spinelles et des fragments de serpentinite incluent dans la gangue carbonatée. Les LMM représentent d'anciens niveaux mylonitiques de la gangue de serpentinite.

## C. Valorisation des données – article scientifique en révision

Ce premier chapitre a été valorisé dans une publication scientifique soumise dans la revue scientifique *Ore Geology Reviews*. Cet article reprend l'étude pétro-structurale et géochimique menée à la compréhension des gisements cobaltifères et nickélifères de la mine de Bou Azzer.

### Co-Ni-arsenide mineralisation of the Bou Azzer deposit (Anti-Atlas, Morocco): New model of formation and tectonic implications

*Tourneur Enora<sup>1</sup>; Chauvet Alain<sup>1</sup>; Kouzmanov Kalin<sup>2</sup>; Tuduri Johann<sup>3,4</sup>; Paquez Camille<sup>5</sup>, Sizaret Stanislas<sup>4</sup>; Karfal Abdelhak<sup>6</sup>; Moundi Younes<sup>6</sup>; El Hassani Abdelfattah<sup>6</sup>*

<sup>1</sup>: UMR 5243, Géosciences Montpellier, University of Montpellier, cc60, Place E. Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 5, France

<sup>2</sup>: Department of Earth sciences, University of Geneva, 1205 Geneva, Switzerland

<sup>3</sup>: BRGM, F-45060 Orléans, France

<sup>4</sup>: ISTO, UMR7327, Université d'Orléans, CNRS, BRGM, F-45071 Orléans, France

<sup>5</sup>: Géosciences Réunion (LSTUR), University of La Réunion, 15, Avenue René Cassin, CS 92003, 97744 Saint Denis Cedex 9

<sup>6</sup>: Managem Group and CTT, Twin Centre-Tour A, BP16016, Casablanca, Morocco

#### Abstract

The Co-Ni Bou Azzer ore district is located in the central part of the Moroccan Anti-Atlas and is one of the world's leading producers of cobalt. The two main types of mineralisation recognised in the district, i.e., “contact” mineralisation and “cross-cutting” structures have been re-defined here based on new field observations, textural features and mineral composition. The contact type mineralisation, referred to as *massive mineralisation* here, consists of elongated lenses of massive Ni-Co-Fe arsenides that represent the main ore bodies in the district. These massive lenses occur in a core of carbonate or siliceous gangue and are located systematically in-between ultramafic rocks (serpentinite of the supposed ophiolitic complex of Bou Azzer) and quartz diorite intrusion or Upper Neoproterozoic volcanic rocks. Mineralised structures cross-cutting the different lithologies, referred to as *vein system* in the present study, are ore-bearing only along some segments – where they are in direct contact with or are close to the serpentinite. They are characterised by Co-Fe mineralisation and syn-tectonic infill indicating transcurrent/normal conjugated N-S to NE-SW kinematics. The two types of mineralisation exhibit a rather similar mineralogical three-stage history, starting by a Ni-rich

arsenide stage (mainly expressed within the massive mineralisation); followed by a massive Co-arsenide stage recognised in both mineralisation styles, and ending with Fe-rich arsenide and base metal sulphide stage. It remains uncertain if the two mineralisation styles at Bou Azzer are formed during a single continuous event, or during two distinct events.

Field observations, microstructural, tectonic, textural and mineralogical analyses led us to propose a complete model of formation of the Bou Azzer ore district in which massive mineralisation was formed by percolation, leaching and replacement of previously formed breccia levels composed mainly of serpentinite (later replaced by gangue minerals) and magnetite/spinel (later leached and replaced by Co-Ni ore minerals) fragments. We demonstrate that the massive mineralisation was formed as a replacement of former serpentinite breccias and serpentinitisation continues during the earlier stages of Co-Ni mineralisation. A tectono-hydrothermal event controlled by a NE oriented transtension generates the vein system, associated with partial leaching and reconcentration of metals from the massive mineralisation. We discuss a possible temporal continuum between the two mineralisation styles in the district: massive mineralisation is coeval with serpentinitisation (serpentine neoformation) whereas the vein system shows a magmatic affinity (early K-feldspar formation). The new model has also tectonic implications, because serpentinite breccia lenses, favourable high-permeability environment for the massive mineralisation, can be compared to ophicalcic rocks frequently developed in context of mantle exhumation by detachment. Within the massive mineralisation, we differentiate: i) Brecciated Massive Mineralisation (BMM) - developed in the core of the ophicalcic levels, and ii) Laminated Massive Mineralisation (LMM), more scarce, formed within ancient mylonitic serpentinite levels corresponding to zones of intensive deformation. If the geodynamic significance will not be addressed in this article, we propose and discuss in conclusion the definition of an alternative view to the classical massive sulphide deposit in which the presence of exhumed mantle rocks allows the formation of massive arsenide deposits.

**Keywords:** Co-Ni Bou Azzer district; Hydrothermalism; Serpentinite; Vein; Arsenide massive ores; Tectonic implications

## **1. Introduction**

The global growth forecast on the electric vehicle (EV) market is attributed to advances in electrochemical energy storage technologies implying cobalt for instance. As Democratic Republic of Congo (DRC) and China have the monopole as major producers, Co supply has issues of risk of disruption. In order to help bridging the gap between supply and demand, Co consuming countries have to diversify their supply sources, focusing on both minerals exploration and EV batteries recycling.

Economic concentrations of Co are almost always considered as by- or co-product of mining where Co is associated with Cu and/or Ni. The only exception is the Bou Azzer Co-Ni-As (-Au) deposit in Morocco that hosts the only mine in the world where Co is produced as a primary product. Five main cobalt deposit types are presently identified worldwide and they are associated to different geological settings: 1) sediment-hosted stratiform Cu-Co deposits such as the Central African Copper Belt in DRC and Zambia in which Cu and Co are mostly concentrated by diagenetic processes (Cailteux et al., 2005; Hitzman et al., 2012); 2) magmatic sulphide deposits such as the giant Noril'sk-Talnakh, Sudbury and Kambalda Ni-Cu(-PGE-Co) deposits in Russia, Canada and Australia, respectively (Arndt et al., 2005; Naldrett, 2005); 3) secondary concentrations within lateritic profiles, such as the Koniambo Ni(-Co) deposit, in New Caledonia (Butt and Cluzel, 2013; Freyssinet et al., 2005); 4) Mn-nodules and Co-rich crusts on the oceanic seafloor (Hein and Koschinsky, 2014; Manheim and Lane-Bostwick, 1988); and 5) five-elements vein type deposits (Bi-Co-Ni-Ag-As±U) (Bastin, 1939; Kissin, 1992), also interpreted as hydrothermal and volcanogenic in origin but caused by brines circulation in continental rifting and crustal thinning environments (Kissin, 1988; Markl et al., 2016; Burish et al., 2017).

The Co-Ni-As (-Au) Bou Azzer mining district constitutes an enigmatic and uncommon types of deposit because hosted at the vicinity of hydrated ultramafic rock complex (serpentinite) (Leblanc, 1975; Saquaque et al., 1989; Ennaciri, 1995; Hefferan et al., 2000). If the paragenesis is rather well-known (Leblanc, 1975; Leblanc and Billaud, 1982; Ennaciri, 1995; Ennaciri et al., 1995b; Ahmed et al., 2009; Gervilla et al., 2012), a lot of questions remain unsolved so far: i) mode of formation; ii) nature of mineralising fluid with two alternative hypothesis: a magmatic or a basin-related origin (Ennaciri et al., 1997; Essarraj et al., 2005), and iii) age of formation with alternatives between Neoproterozoic and Paleozoic (Leblanc, 1975; Ennaciri, 1995; Dolansky, 2007; Oberthür et al., 2009). Recent works suggest, mainly based on the mineral assemblage, that the Bou Azzer district can belong to the five-elements vein type deposits (Bi-Co-Ni-Ag-As±U) (Markl et al., 2016; Burisch et al., 2017).

Because hosted at the vicinity of a serpentinite complex, most of the authors agree on the serpentinite source for Co and Ni, leached and concentrated by hydrothermal fluid circulation (e.g. Leblanc, 1975; Ennaciri, 1995). However, the question about the role of serpentinisation and the significance of the geodynamic context in terms of prerequisite for ore formation in this particular environment has never been addressed so far. Recently, serpentinite occurrences have been described in tectonic environments where ultramafic mantle rocks are exhumed in intra-continental extensional setting (Lagabrielle and Bodinier, 2008), along slow and ultra-slow spreading mid-ocean ridges where oceanic core complexes (OCC) occur (Cannat, 1993; Ildefonse et al., 2007), and along hyper-extended rift margins at the ocean–continent transition (OCT; Boillot et al., 1987; Manatchal et al.,



2004, 2006). Serpentinite may also form in subduction settings through slab-fluid infiltration into the fore-arc mantle (Hattori and Guillot, 2003; Deschamps et al., 2013). Considering the seafloor setting, serpentinisation occurs because of seawater circulation through the underlying mantle, and this presents some analogies with the processes of formation of the seafloor massive sulphide deposits. In this last example, percolating seawater fluid can interact with the oceanic crust mainly composed by gabbro and basalt in order to form massive sulphide mineral accumulations enriched in Cu, Zn, Pb, Au, and Ag. No example of a similar process involving the leaching of the mantle has been discussed and proposed in the literature.

This paper integrates the results of a field study and structural, textural, mineralogical, and geochemical analyses of the Co-Ni-As (-Au) Bou Azzer district. A revisited model of formation is proposed and discussed taking into account the various mineralisation types, their distribution and specific geometry, as well as their mineralogical characteristics. It is suggested that both mineralisations (massive lenses and veins) were formed during a unique and continuous mineralisation event. The role and the significance of several parameters such as pre-existing serpentinite breccia along extensional fault/detachment, in-situ replacement processes allowing the formation of Co/Ni minerals at the expense of spinel /magnetite and significance of serpentinite rock as a crucial contributor to the leaching, transport and capture of the metallic phases are addressed. Finally, a tentative of integration of the Bou Azzer district in a new model of formation of “Massive Arsenides” alternative that involved hydrothermal fluid percolation in ultramafic rock complex will be proposed in conclusion. Such a revisited ore forming model constitutes a key for target generation and future exploration for Co-Ni deposits.

## **2. Geological setting**

### **2.1 The Moroccan Anti-Atlas**

The Moroccan Anti-Atlas is located in the southern part of Morocco, south of the High-Atlas Mountains and bordered to the south by the West African Craton (WAC) and to the north by the South-Atlantic Fault (Fig. II27). It is made up of a succession of inliers that are broadly oriented WSW/ENE and characterised by Proterozoic cores overlain by Palaeozoic (mostly Cambrian) sedimentary rocks (Choubert, 1963). The Major Anti-Atlas fault (MAAF) separates two domains: the eastern domain including the Saghro, Siroua and Ougnat inliers and parts of the Bou Azzer-El Graara, whereas the western domain includes nearly 10 inliers and the remaining part of the Bou Azzer-El Graara one. The Bou Azzer-El Graara thus occupies a central position in the Anti-Atlas. Field relationships also suggest that the Eastern Anti-Atlas only exposes Neoproterozoic terranes, while the Western Anti-Atlas exposes a Paleoproterozoic basement overlain or intruded by Neoproterozoic sedimentary, volcanoclastic and granitoid rocks (Youbi et al., 2013). Four orogenic cycles affected the Anti-Atlas area occurring during the Paleoproterozoic (Eburnean: Ennih and Liégeois, 2001), the

Neoproterozoic (Panafrican: Triantafyllou et al., 2016; Tuduri et al., 2018a), Paleozoic (Variscan: Burkhard et al., 2006) and the Cenozoic (Alpine: Missenard et al., 2006). The Proterozoic orogenic cycle, mostly concerned by this study, has been historically divided into three main periods called PI, PII and PIII and affected by two major tectonic events (B1 and B2: Choubert, 1945, Leblanc, 1975). If PI terranes were previously attributed to the Paleoproterozoic, some have been revisited and now belong to the Neoproterozoic era. PII and PIII were attributed to the Neoproterozoic. The B1 and B2 tectonic events are related to the Panafrican orogenic cycle. A new subdivision into two complexes (lower and upper ones) has been recently proposed (Tuduri, 2005; Tuduri et al., 2018a) and appears more appropriate for linking the sedimentary, volcanic and plutonic rocks within the two tectono-magmatic events that are supposed to affect the Anti-Atlas. The term “complex” is herein employed because the two events that affected the Anti-Atlas cannot be described as classical orogenic-related events but more likely as an association between volcanism, magmatism and tectonics that strongly influences the nature of the lithologies. Indeed, the main tectono-magmatic events that characterise the Neoproterozoic orogeny are: i) a first magmatic-tectonic event mainly associated with massive high K calc-alkaline magmatism emplaced in core of weakly deformed meta-sediments controlled by a transpressive tectonism (features integrated within the lower complex; e.g., Choubert, 1963a; Thomas et al., 2004; Barbey et al., 2004; Tuduri, 2005; Gasquet et al., 2005; Walsh et al., 2012; Tuduri et al., 2018a,b); ii) a transtensive deformational event associated with intense magmatism, volcanism and volcano-sedimentary formation (the upper complex), sequences overlying the deformed lower complex and sometimes associated with the development of ash-flow caldera (Gasquet et al., 2005; Walsh et al., 2012; Tuduri et al., 2018a).

In both the Siroua and Bou Azzer inliers, an uncertainty remains on the early occurrence of obduction and oceanic basin closure (suture zone) due to the supposed existence of one or two subduction zones. Several geodynamic interpretations have been proposed and discussed on this crucial point of the Neoproterozoic Anti-Atlas evolution (Gasquet et al., 2005; Bousquet et al., 2008; El Hadi et al., 2010; Walsh et al., 2012; Triantafyllou et al., 2018) but consensus has never been reached (see below).

## **2.2 The Bou Azzer inlier**

Located in the central part of the Moroccan Anti-Atlas (Fig. II27), the Bou Azzer-El Graara inlier represents one the most famous inlier in Morocco, because this was one of the first descriptions of a Proterozoic oceanic lithosphere (Leblanc, 1975) and also because of its spectacular and unique worldwide Co-Ni mineralisation. The Bou Azzer inlier has been defined as an ophiolite complex supposed to be a Neoproterozoic suture zone (Leblanc, 1975, 1976, 1981; Bodinier et al., 1984). The inlier is parallel to the AAMF (Fig. II27b), and some faults were assigned to the major fault of Anti-Atlas because of the same orientation. The inlier is thus characterised by large amounts of

serpentinised mantle ultramafic rocks associated with gabbro and basaltic pillow rocks (Leblanc, 1975, 1976, 1981; Bodinier et al., 1984) surrounded by late Neoproterozoic volcanoclastic rocks and infracambrian sedimentary sequences (Thomas et al., 2002; Walsh et al., 2012). There, the closure of an oceanic basin may have driven to the obduction of the ophiolitic unit during a period bracketed between 640 and 788 Ma (Clauer, 1976; Leblanc, 1981; Thomas et al., 2002; Samson et al., 2004; Blein et al., 2014). If confirmed, this suture should be localised between the Cadomian block to the north and the WAC to the south. Following the formation of the ophiolite complex, the lower complex units consisting of deformed metavolcanic and metasedimentary rocks that represent a late orogenic detrital sequence were emplaced. The latter are intruded by high-K calc-alkaline plutons of granodiorite, quartz diorite and gabbro at ca. 650- 630 Ma (Thomas et al., 2004; Inglis et al., 2005; El Hadi et al., 2010). The upper complex is characterised by numerous volcanic sheets, mostly ignimbritic, belonging to the Ouarzazate supergroup of Thomas et al. (2004), and deposited during a long-lived extensional-transensional stage beginning around 585-580 Ma and building up until 550-540 Ma (Mifdal and Peucat, 1985; Blein et al., 2014; Tuduri et al., 2018). Most of these rocks are composed of dacitic to rhyolitic ignimbrites and andesitic tuffs and overly all the units of the Bou Azzer inlier. Calc-alkaline to high-K plutonic rocks may continue to intrude these volcanoclastic units (Thomas et al., 2004). Both the lower and upper complex units are affected by greenschist facies metamorphism (Bodinier et al., 1984; Wafik et al., 2001), which would be inconsistent with an obduction model. A sedimentary cover sequence composed of conglomerates and carbonate rocks overlies all the units and marks the transition to the Precambrian/Cambrian (Pouit, 1966; Bouchta et al., 1977; Tucker, 1986; Latham and Riding, 1990; Gasquet et al., 2001). This unit has been locally named the Adoudounian.

### **2.3 The Bou Azzer mineralised district**

Two main districts can be defined within the whole Bou Azzer inlier (Fig. II27): the Bou Azzer Co-Ni-As (-Au-Ag) district in the western and central parts including the Taghouni, Bou Azzer, Aghbar, Tamdrost, Ambed and Aït Ahmane ore deposits, all related to serpentinite massifs, and the Bleida Au-Cu (-Pt-Pd) district located in the south-eastern part (El Ghorfi et al., 2006). Note that Cu-occurrences are also common and are mostly localised in the infracambrian sedimentary cover (Fig. III; Bourque et al., 2014; Maacha et al., 2015). The Co-Ni Bou Azzer district is operated by the Compagnie de Tifnout Tiranimine (CTT), a subsidiary of Managem, a Moroccan industrial mining group.

With respect to the Co-rich mineralisation, three main ore deposit types have been described in the Bou Azzer district (Leblanc and Lbouabi, 1988; Ennaciri, 1995; Ennaciri et al., 1995b; Maacha et al., 2012): i) Co and Ni arsenide contact mineralisation as massive lenses located at the contact between serpentinite and quartz diorite and sometimes along the contact with the Upper

Neoproterozoic volcanic rocks of the Ouarzazate supergroup; **ii**) Co-rich veins cross-cutting all the lithologies; and **iii**) Ag-rich stockwork zones all emplaced along the contact aureole of the quartz diorite pluton within the serpentine. Such a contact aureole is characterised by the occurrence of rodingite - a Mg-Ca±Mn metasomatic rock related to serpentinisation (Leblanc and Lbouabi, 1988; Essaraj et al., 2005; Borisenko et al., 2014). Five mineralisation stages have been proposed at Bou Azzer (Leblanc, 1975; Ennaciri, 1995; Ennaciri et al., 1996; Ahmed et al., 2009): **i**) Ni-arsenides, mainly nickeline (NiAs) and rammelsbergite (NiAs<sub>2</sub>); **ii**) Co-arsenides represented by safflorite ((Co,Fe,Ni)As<sub>2</sub>), its monoclinic dimorph (*i.e.*, clinosafflorite) and skutterudite ((Co,Ni)As<sub>3</sub>), sometimes associated with scarce native gold; **iii**) Fe-arsenides characterised by loellingite (FeAs<sub>2</sub>); **iv**) sulfo-arsenide assemblage including gersdorffite (NiAsS), cobaltite (CoAsS) and, arsenopyrite (FeAsS), and **v**) the sulfide and sulfosalt assemblage with chalcopyrite (CuFeS<sub>2</sub>), sphalerite (ZnS), tennantite-tetrahedrite ((Cu,Fe)<sub>12</sub>As<sub>4</sub>S<sub>13</sub> - (Cu,Fe)<sub>12</sub>Sb<sub>4</sub>S<sub>13</sub>) and a farewell association includes molybdenite (MoS<sub>2</sub>), with minor brannerite ((U,Ca,Ce)(Ti,Fe)<sub>2</sub>O<sub>6</sub>) (Oberthür et al., 2007, 2009). All assemblages are associated with carbonate and siliceous gangue sometimes containing chlorite and talc.

The division in early “contact” mineralisation and final “cross-cutting” one (also called “croiseurs” in French) serves as guides for CTT’s geologists and miners in both exploration and operation activities. However, no satisfying model of formation has been proposed for the formation of the economic mineralisation so far. Hereafter based on textural and mineralogical arguments and the recognition of massive Co-Ni arsenide bodies in the core of the “contact” mineralisation. The latter hereafter is called - “massive” ore mineralisation, whereas the “cross-cutting” one is defined as veins or vein system.

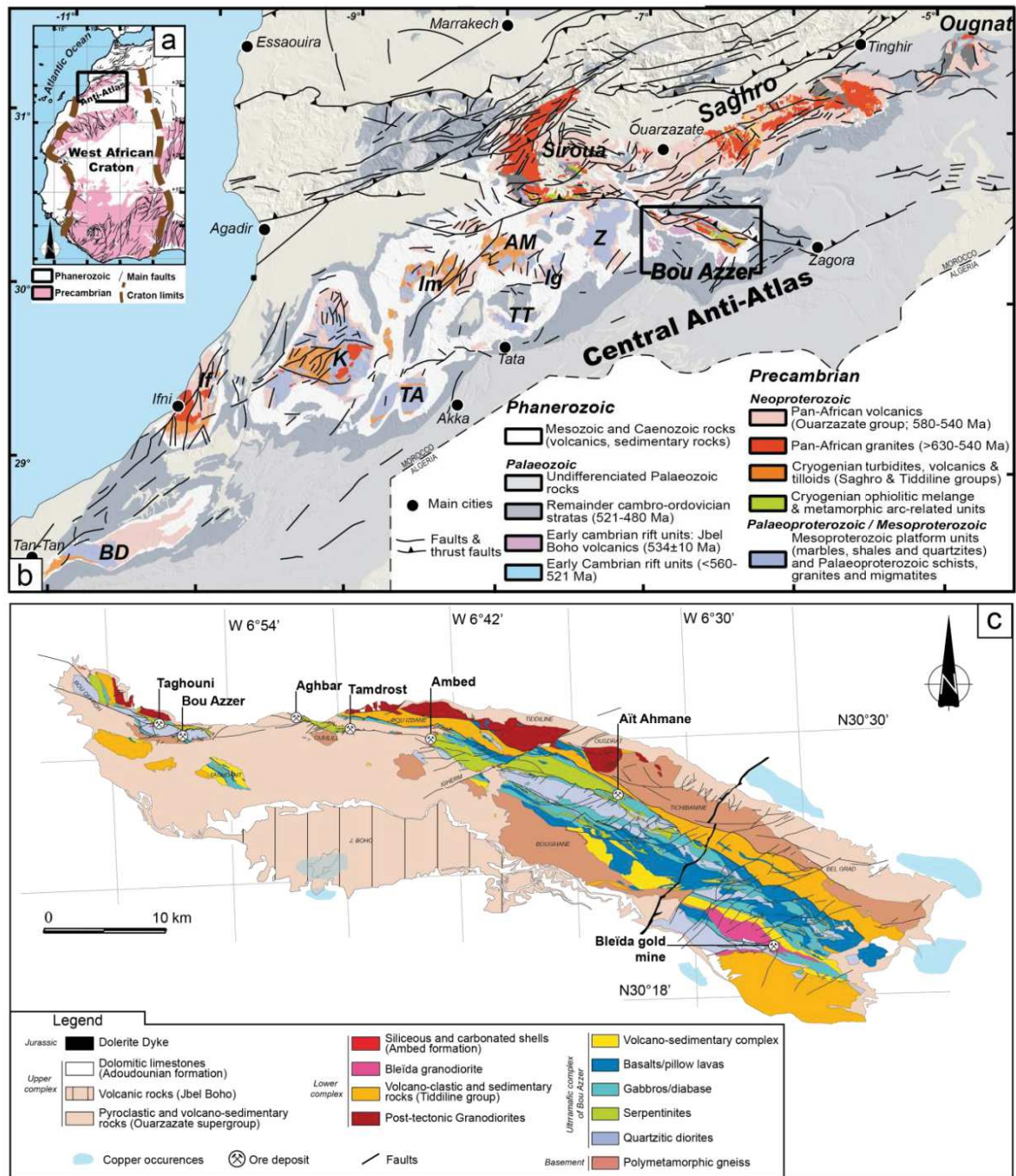


Figure II.27 : a) Localisation of the studied area at the WAC (West African Craton) scale and b) at the Anti-Atlas of Morocco scale (Tuduri et al., 2018) (name of the inliers: AM: Agadir-Melloul; BD: Bas Drâa; If: Ifni; Ig: Iguerda; Im: Igherm; K: Kerdous; TA: Tagragra of Akka; TT: Tagragra de Tata; Z: Zenaga) - c) Geological map of the Bou Azzer district modified after Leblanc (1975) and Admou et al. (2013)

### 3. Methods

Samples for this study were collected in underground galleries on mining sites up to 510 m deep to understand the relationship between structures on surface and in depth (Figs. II1 and 2). In total, 72 polished thin sections (30µm-thick) were prepared for understanding the petro-structural features of the Bou Azzer ore deposit among 14 contact and 48 cross-cutting structure types.

Microanalysis was carried out using a FEI Quanta FEG 100 Scanning electron microscope (SEM) and a Cameca SX100 electron probe microanalyser (EPMA) at the Service inter-regional Microsonde-Sud, Montpellier. Major and minor elements were measured in silicate and arsenides and sulfides grains with the same beam current of 10nA and accelerating voltage of 20 keV. Nine major elements were analysed for arsenides and sulfides (standards, spectral lines, and spectrometers were as follows): Co (Co, K $\alpha$ , LLIF), Ni (Ni, K $\alpha$ , LLIF), Fe (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K $\alpha$ , LLIF), Cu (Cu, K $\alpha$ , LLIF), Zn (Zn, K $\alpha$ , LLIF), Pb (PbTe, M $\alpha$ , LPET), Ag (Ag, L $\alpha$ , LPET), Au (Au, M $\alpha$ , TAP), As (GaAs, K $\alpha$ , LLIF). Peak counting times ranged from 60 to 240 s. The concentration of major elements are summarised in Appendix II.2, in which values with no data were those below the detection limit of the electron probe. Apfu compositions were calculated considering the atomic total of the stoichiometric mineral formulae of arsenide (for example, atomic total of skutterudite is 3.5 apfu; atomic total of safflorite is 3 apfu).

Automated mineral analysis and textural imaging of the studied samples (thin sections) were performed using an FEI QEMSCAN® Quanta 650F facility at the Department of Earth Sciences, University of Geneva, Switzerland. The system is equipped with two Bruker QUANTAX light-element energy dispersive X-ray spectrometer (EDS) detectors. Analyses were conducted at high vacuum, accelerating voltage of 25 kV, and a beam current of 10 nA on carbon-coated polished thin sections. Field Image operating mode (Pirrie et al., 2004) was used for analyses. In total 221 individual fields were measured per sample, with 1500 µm per field, and point spacing of 5 µm. The standard 1000 counts per point were acquired, yielding a limit of detection of approximately 2wt% per element for mineral classifications. Measurements were performed using iMeasure v5.3.2 software and data processing using iDiscover® v5.3.2 software package. Final results consist of: i) high-quality spatially resolved and fully quantified mineralogical maps; ii) BSE images with identical resolution as the mineralogical maps; iii) X-ray element distribution maps. In addition to microscopic observations and EPMA microanalysis, QEMSCAN is an analytical technique allowing determination of mineralogical variability based on chemistry at micrometre-scales. By mapping the sample surface, low-count energy-dispersive X-ray spectra (EDX) are generated and provide information on the elemental composition at each measurement point. Mineralogical and elemental maps of both mineralised structures were created.

Specific samples were analysed by Raman spectroscopy using a Renishaw Invia spectrometer equipped with a Peltier-cooled silicon CCD detector using a 532 nm laser excitation wavelength (laserpower 30 mW, 2400 g/mm grating, spectral resolution  $\sim 1 \text{ cm}^{-1}$ ) at Charles Coulomb Laboratory, Montpellier, France. The excitation beam is provided by a Stabilité 2017 Ar<sup>+</sup> laser (Spectra Physics, Newport Corporation) at 514.53 nm and a power of 200 mW (resulting in  $\sim 20$  mW at sample), focused in the sample using a x100 objective (Olympus). A total of two acquisitions were accumulated to provide a satisfactory spectrum. To characterize the bands in the Raman spectra and identify the phases present, the online database of the French Society of Mineralogy and Crystallography and the software CrystalSleuth with the RRUFF Project database (Downs, 2006) were used (Appendix II.3). Raw data were processed using LabSpec software designed for the Jobin-Yvon Horiba LabRAM instruments.

#### 4. Macroscopic study of the Bou Azzer mineralisation

##### 4.1 Generalities on global geometry and geology

The 3D model in figure 28 summarizes the distribution of geological units and the Co-Ni Bou Azzer ore deposits exploited for more than 1928 years. 60 dispersed ore deposits and includes 10 mining sites, 6 quarries and field zones. This also represents the occurrence of the main mining sites from west to east and highlights the occurrence and the relationships laterally and at depth all along the Bou Azzer district between the two mineralised ore deposit type: i.e., the massive ore and vein systems. The ultramafic complex of Bou Azzer is composed of the ancient oceanic crust (mafic dykes, layered gabbro, diabase, basalt and pillow lavas), the serpentinised upper mantle and granitoid plutons intruding both the oceanic crust and the arc units (Leblanc, 1975). The following remarks can be addressed:

- i. The serpentinites appear as dismembered lenses up 10 km long, close to the *Ait Ahmane* area (Fig. II28). They always occur as central domes surrounded by the volcanic rocks of the upper complex in the north and by metabasic rocks in the south, certainly relicts of the ancient oceanic crust (Beraaouz et al., 2004). In the present study most of the contacts between serpentinite and the overlying units are interpreted, as extensional faults. This interpretation is based on new field observations (Fig. II29) and will be the topic of a parallel publication which is in preparation.
- ii. Quartz-diorite appears to be intrusive always within both serpentinite and basic rocks always south of the serpentine (Fig. II29b). Most of the exploited deposits are also located south of this dome, whatever their typology (massive or veins) is and along the contact between serpentinite and quartz-diorite (Fig. II28).
- iii. Two main structural directions exist: the N110°E-120°E general trend of the lithological units (Fig. II28) and the NNE crossing faults (see also Fig. 30). The massive bodies occur

always parallel to the N110°E contact except at *Bou Azzer East* (BAE) and *Aghbar* domains where massive mineralisation can occur along NS contacts (Fig. II28). Inversely, all mineralised veins occur along the NNE faults, those that intersect the massive mineralisation even if the mineralised part is only at the vicinity of the serpentinite/quartz diorite contact.

- iv. The NNE faults do not cross the entire inlier, with one exception - the *Igherm* fault which is the longest structure affecting also the Infracambrian and Cambrian units (Figs. II27 and 28). This is the unique fault in the area which is not mineralised, even in its part that cross-cut the serpentinites.
- v. The vein system always intersects the massive mineralisation (*Bou Azzer centre*, *Bou Azzer East – P3 and P6*, *Aghbar*, *Bouismass*, *Oumlil*, *Tamdrost*, *Filon 53 at Aït ahmane*). One can note that these sites only occur in the western and central parts of the district, domains where the serpentinitised ultramafic mantle crops out certainly because mostly exhumed (Leblanc, 1975).
- vi. Specific formation of carbonate and siliceous shells are on the top of the contact with serpentinite (Leblanc, 1975) (Fig. II28). These shells show specific characteristics including strong brecciated aspect of the serpentinite, intense hydrothermal activity, fragments of serpentinite and faulted contacts. If kinematics is difficult to observe, several places demonstrate rather a normal motion (Fig. II28).
- vii. Near the *Taghouni* and *Bou Azzer centre* sites, the third type of mineralisation occurs as disseminated silver and associated stockwork that are developed within the intrusive quartz diorite (Leblanc and Lbouabi, 1988). This mineralisation style has not been investigated in the present study and thus not considered in the further discussion.



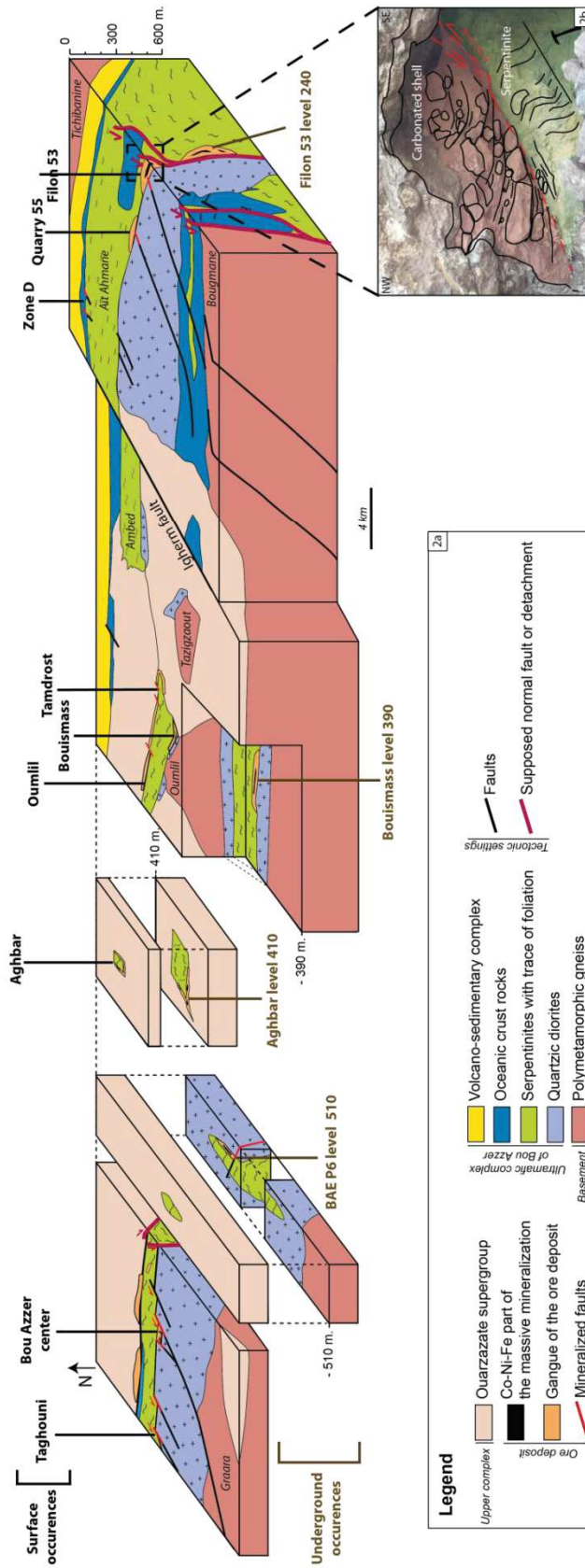


Figure II.28 : a) Simplified block diagram showing the distribution of the main geological units of the Co-Ni Bou Azzer district and also the main ore deposits studied in this study, b) Detachment fault exhibiting normal displacement observed between brecciated shell and serpentinite.

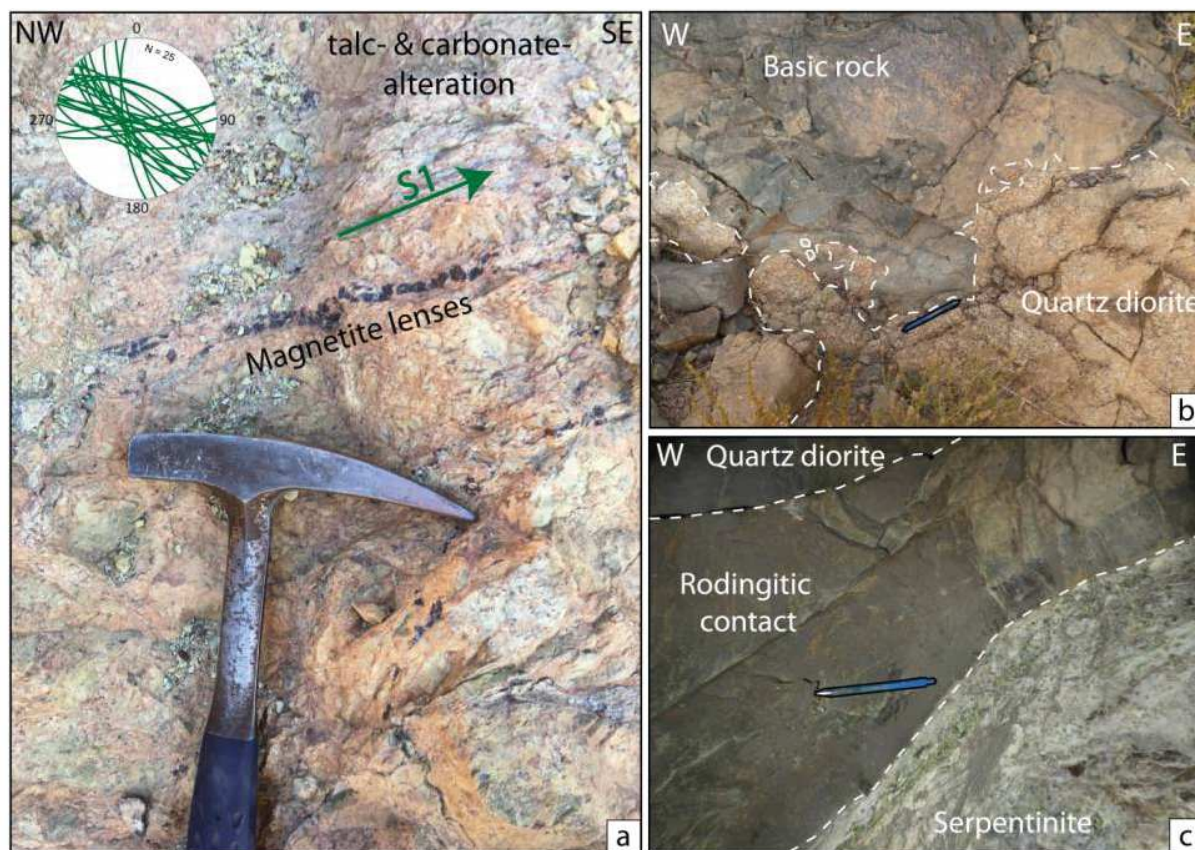


Figure II.29 : Photographs of host rocks - a) Massive serpentinite with lenses of magnetite, talc- and carbonate-alteration and *Stereographic* projections of the serpentinite cleavage. b) Intrusive contact of quartz diorite in mafic rocks. c) Rodingitic contact between serpentinite and quartz diorite

#### 4.2 Surface observations

At surface, *serpentinite* colour is green in zones preserved from the intense carbonation and the talc-alteration (Fig. II29a). Serpentinities are constantly affected by a N120°E trending foliation frequently underlined by magnetite-rich lenses (Fig. II29a). These linear to dispersed magnetite-rich beds are observed in few places like and *Bou Azzer Centre* and *Bou Azzer East Puit 3*, for example. The significance of such magnetite-rich structures will be discussed further. Close to the contact, the serpentinite texture is difficult to recognize but several locations show the presence of breccias with serpentinite fragments (Fig. II30d).

*Quartz diorite* shows a greyish to greenish colour and feldspar and quartz are recognizable. An albitisation, and greenschist facies metamorphism marked by chloritisation and epidote-rich alteration affect the quartz diorite. Disseminated metallic minerals were observed but not determined at this scale. When the contact between serpentinite and quartz diorite is not mineralised, it exhibits a red rodingite level that is supposed to represent a byproduct of the serpentinisation process or maybe the effect of the contact metamorphism between serpentinite and magmatic rocks (Fig. II29c; Leblanc and Lbouabi, 1988). The field relationships between serpentinite and quartz-diorite intrusion are not easy to define. However, several observations suggest that quartz-diorite is intrusive (Fig. II29b).

All structures of the *vein system* intersect the whole geological units including the massive ore (Fig. II30a) and may reach several hundred meters long. They are filled mainly by quartz and/or carbonate, such as in the *Aghbar* sector where one can observe a huge left-lateral pull apart only filled by calcite and quartz, representative of the aspect of the vein system at surface and far from the mineralised areas (Fig. II30b). The economic mineralisation generally does not occur at surface. Veins at surface can reach several hundred meters long (Fig. II30a). *Filons 7* and *5* at *Bou Azzer Centre* illustrate the two main orientations in surface. *Filon 7* is oriented N60 80SE whereas *Filon 5* trends N10 85 NNE. They meet together more to the south following the orientation of *Filon 7* (Fig. II30c). A massive siliceous gangue associated with Cu-bearing euhedral and white carbonate pockets separating the serpentinite from the quartz diorite is observed on surface and this, at large distance from the mineralised part of the veins (Fig. II30c). At the *quarry 52* (see location on figure 28), the massive mineralisation that classically separates the serpentine from the quartz diorite is cross-cutted by vein of the vein system (Fig. II30e). Thus the chronology between the two systems is here confirmed.

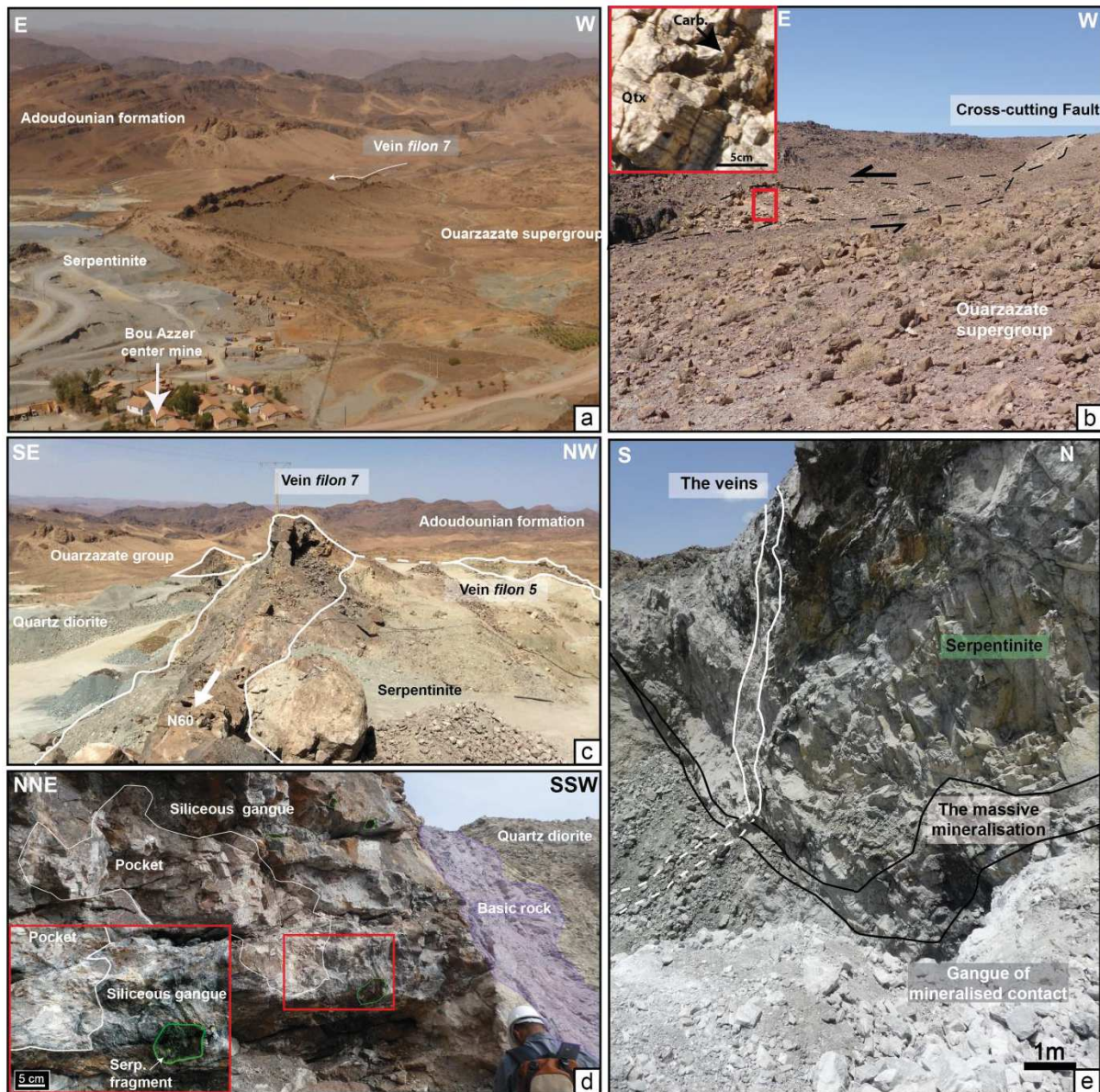


Figure II.30 : Photographs of surface structures. a) Large view of the *Bou Azzer Centre* mine showing the *Filon 7* extension reaching several hundred metres long. b) Pull-apart structure on surface composed of a siliceous gangue and exhibiting massive and/or laminated texture (zoom in the red square). c) *Filon 7* aspect at surface after its junction with the *Filon 5*. d) *Bou Azzer East* field zone showing the contact between serpentinite, siliceous shell, basic rock and quartz diorite. The siliceous gangue is affected by carbonate-rich large-scale pocket (white circle) and contains serpentinite fragments (green circle). e) *Quarry 52* image representing veins cutting the massive mineralisation and serpentinites.

### 4.3 Underground observations

At depth, the massive mineralisation has been observed mainly at the contact between serpentinite and quartz diorite. The massive mineralisation is composed of Co-Ni-Fe-bearing massive elongated ore body, at 2 to 20 meters-thick, 15 to 30 meters-long and always hosted in a quartz/carbonate gangue (Figs. II31a-b). Because of its nature, the massive mineralisation does not allow to make kinematic observations. Euhedral nickeline, skutterudite and loellingite can be observed sometimes in galleries. Gangue texture is frequently massive, whatever its nature is - carbonate or siliceous (Fig. II31a-b). Massive siliceous gangue is composed mainly of quartz, chlorite,

fragments of spinel and chalcopyrite. The carbonate gangue is the most abundant and shows three types of assemblages: i) laminated texture with carbonate/chlorite assemblage, ii) granular texture with blueish calcite (Fig. II31a), and iii) euhedral texture with white calcite and dolomite. These textures arise some questions about the nature of the photolith of the massive mineralisation. Serpentine fragments were also frequently observed in the carbonated gangue of the massive mineralisation.

The veins exploited for Co and Fe by high-angle dipping veins remarkably exposed within underground levels. The veins are 2 to 20 cm-thick, and mineralised on about 20 meters long only in the segment hosted within the quartz diorite. The vein system is difficult to follow inside the serpentinites where the large vein seems to be replaced by numerous thinner and barren fractures. Differently to the massive mineralisation structures, the veins show a large variety of internal textures with mainly breccia, lamination, massive or comb-type infill (Fig. II31c). Minerals involved are quartz, Co-Fe minerals and late yellow euhedral calcite or dolomite that frequently surrounds fragments of quartz diorite and/or fragments of mineralisation (Fig. II31c). The fact that numerous textures are equally represented indicates that the vein structures were also active as fault zones and the distribution of the different texture depends of their location with respect to the zone of the fault. The pockets have the same mineralogical and textural characteristics as the veins systems. Kinematic indicators observed in the mineralised faults are summarised in the next section. Breccias are specifically located in extensional pull-apart structures, whereas laminated textures characterise regular segments with homogeneous thickness and comb-type infill in open-type structures in position of tension-gashes.

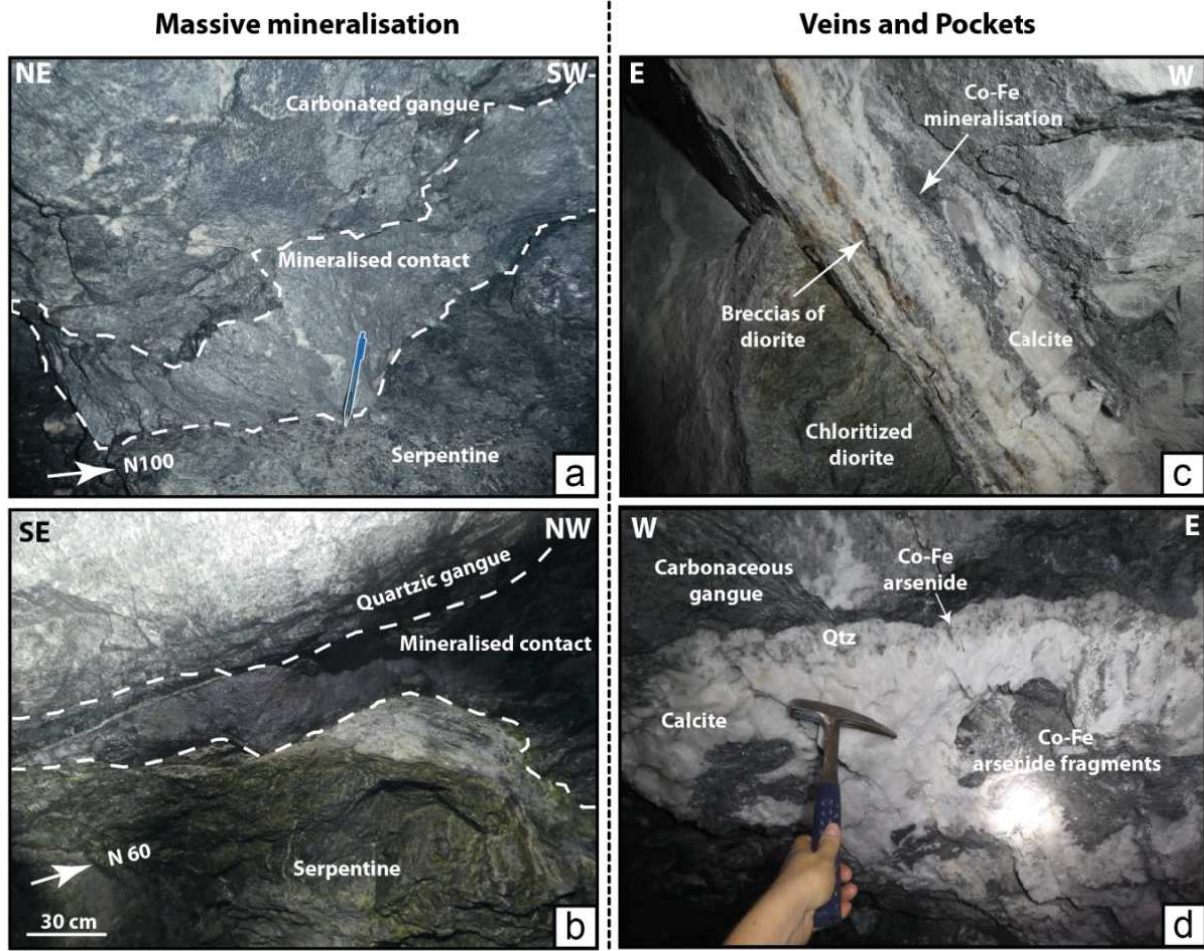


Figure II.31 : Macroscopic aspect of the massive mineralisation and the veins in underground galleries. a) Typical Co-Ni-Fe bearing massive mineralisation separating serpentinite and carbonated gangue (*Aghbar* underground mine). b) Similar massive mineralisation against siliceous gangue (*Bou Azzer East P6*). c) Veins showing brecciated texture (with diorite fragments mainly) and composed of Co-Fe bearing minerals and late euhedral calcite pocket (Cal) (*Bou Azzer East P3*). d) Pockets composed of quartz/chlorite/skutterudite border, follows by comb-quartz associated with Co-Fe arsenide. Late rhombohedral calcite linked to fragments of Co-Fe arsenide is visible in the centre of the pockets (*Filon 53*).

The veins exploited for Co and Fe by high-angle dipping veins remarkably exposed within underground levels. The veins are 2 to 20 cm-thick, and mineralised on about 20 meters long only in the segment hosted within the quartz diorite. The vein system is difficult to follow inside the serpentinites where the large vein seems to be replaced by numerous thinner and barren fractures. Differently to the massive mineralisation structures, the veins show a large variety of internal textures with mainly breccia, lamination, massive or comb-type infill (Fig. II31c). Minerals involved are quartz, Co-Fe minerals and late yellow euhedral calcite or dolomite that frequently surrounds fragments of quartz diorite and/or fragments of mineralisation (Fig. II31c). The fact that numerous textures are equally represented indicates that the vein structures were also active as fault zones and the distribution of the different texture depends of their location with respect to the zone of the fault.

The pockets have the same mineralogical and textural characteristics as the veins systems. Kinematic indicators observed in the mineralised faults are summarised in the next section. Breccias are specifically located in extensional pull-apart structures, whereas laminated textures characterise regular segments with homogeneous thickness and comb-type infill in open-type structures in position of tension-gashes.

Figure 32 shows the comparison between surface and gallery aspect of both mineralised structure types at the scale of the ore deposit, in complement of figure 28 that only shows their distribution both at surface and depth. We can summarize the following aspects:

- First, the geometry is similar at surface and at depth. Both mineralisation styles show the same size (Fig. II32a) and similar orientation (Fig. II32b).
- If massive mineralisation is clearly recognizable at depth, one can question about its characteristics at surface. In fact, it appears, as represented in figure 32a that the carbonated or siliceous (birbirite) shells are the surface equivalent of the massive mineralisation at depth. However, these levels were frequently oxidised at surface, having very dark colours.
- Mafic dykes are systematically observed at the limit between serpentinite and quartz-diorite. They present the same position and orientation as the massive mineralisation, but nor mineralisation, nor alteration were observed. Their interpretation remains unknown even though there are supposed to be part of the oceanic crust that can subsist above the upper contact of the serpentinite.

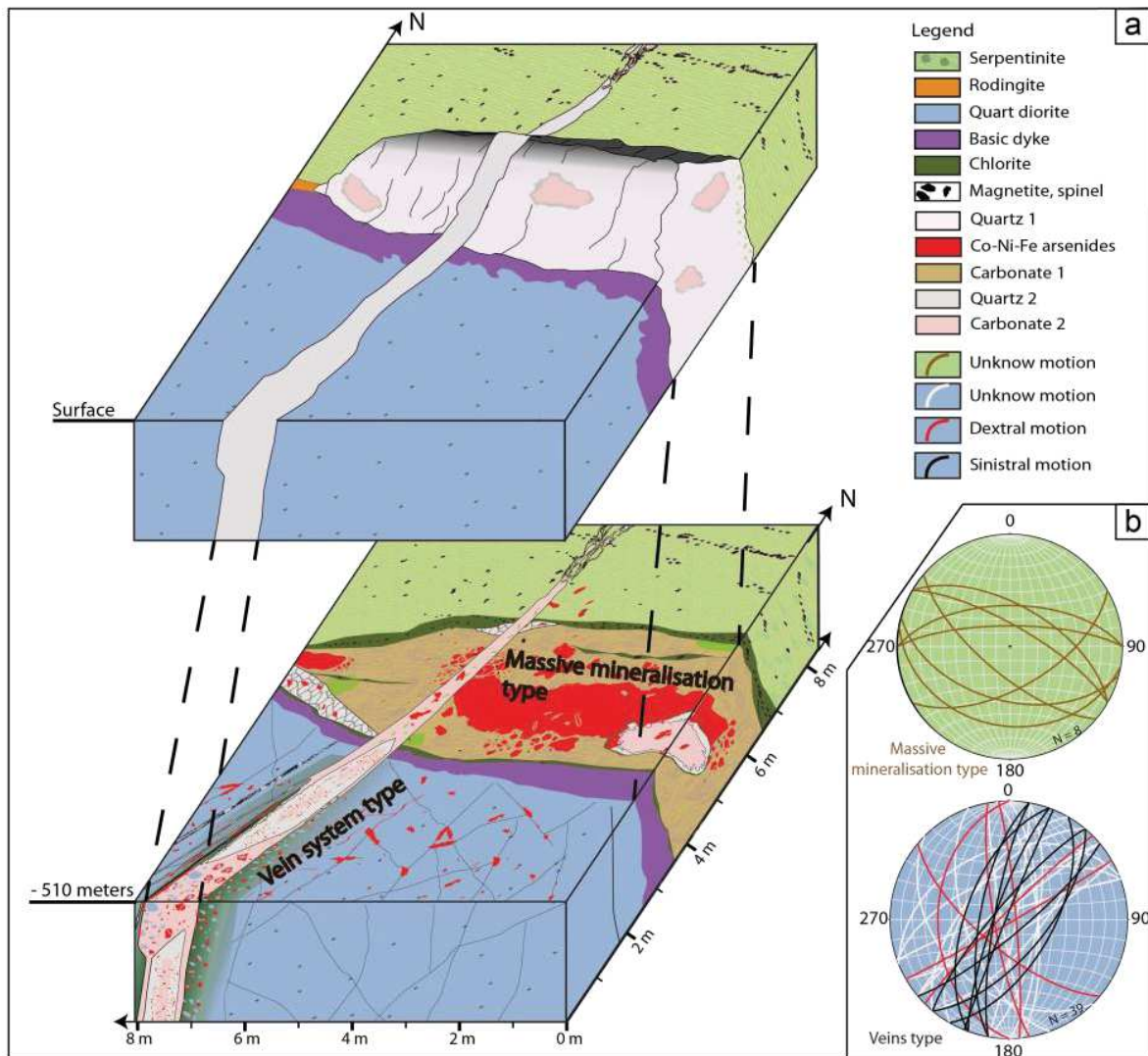


Figure II.32 : 3D sketch on surface and in gallery. a) Comparison between surface and gallery aspect of both mineralisation styles. b) Stereonet diagram of the massive mineralisation and the veins measured on the field.

#### 4.4 Kinematic constraints of the ore deposit

Because of the massive texture of the ore it is rather difficult to conduct kinematic observations in the lenticular ore bodies. These structures strike N120°E, parallel to the Major Fault of the Anti-Atlas which cross-cut the Bou Azzer inlier and dip mostly to the NE or SW (Figs. II27, 28, 30, and 32). Inversely, the vein system exhibits abundant criteria of motion that diverge following the vein orientation. Stereonet diagrams of figure 32b demonstrate that veins mainly trend from N10° to N70°E with a main dipping to W or NW, respectively and values close to 60-80°.



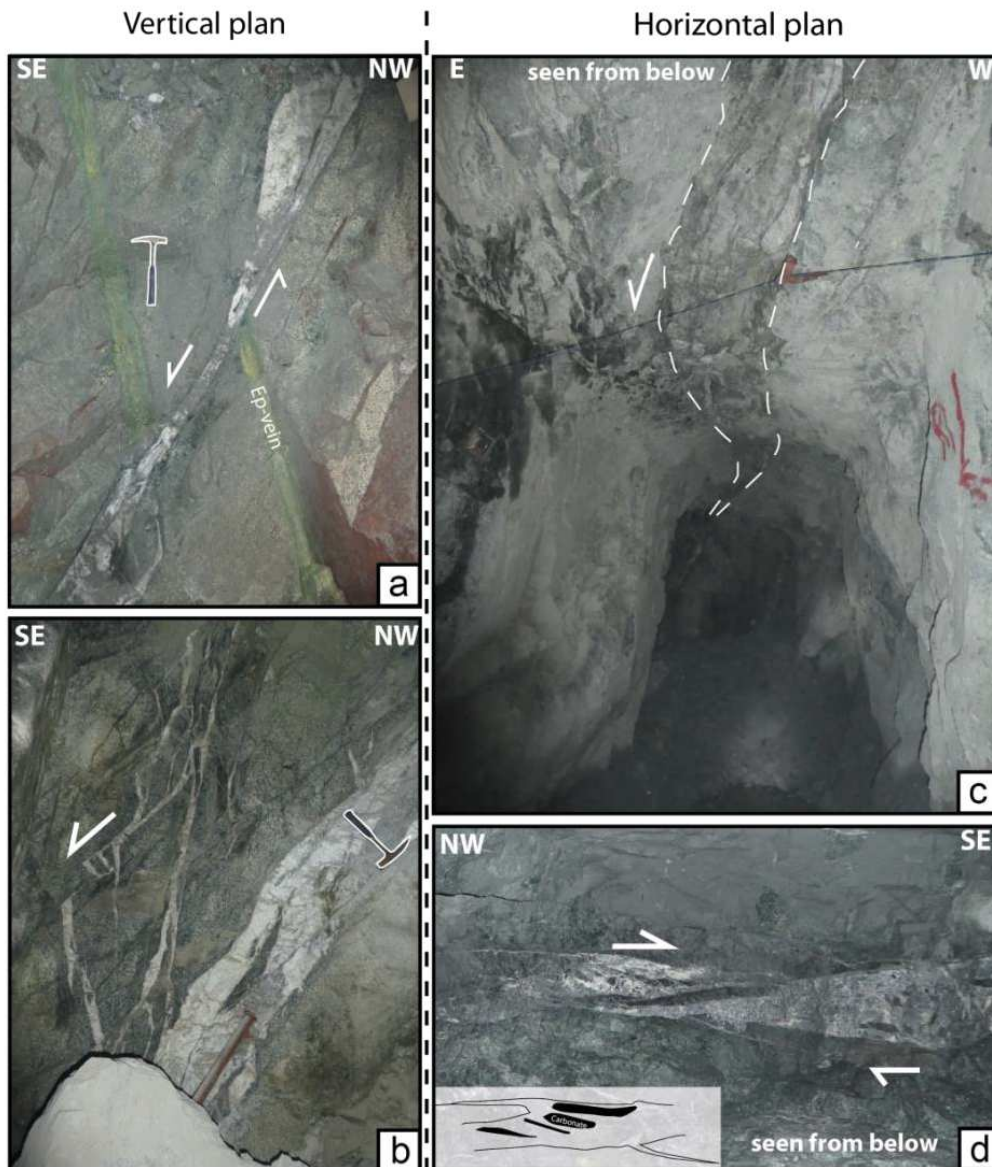


Figure II.33 : Photographs of structures in mining galleries. a and b are photographs of vertical plane. c and d are photographs and corresponding sketch (d), seen from below, of horizontal plane. a) *Filon 53* Normal “cross-cutting” structure illustrated by the offset of the epidote-rich vein (Ep-Vein) (*Filon 53*). b) Similar motion showing by pull-apart structure (Same area, *Filon 53*). c) Cross-cutting mineralised vein trending east and showing dextral motion (*Bouismas area*). d) Cross-cutting mineralised vein trending north-east and showing left-lateral motion (*Bou Azzer East, Puit 3*).

Systematically, a normal vertical motion is observed resulting in pull-apart structures (Figs. II33a, b). Horizontally, both dextral and left-lateral motions are observed as indicated in the *Stereonet* diagram of the figure 32b in which dextral planes are in red whereas left-lateral ones are black. Indeed, the veins trending close to N-S exhibit dextral sense of motion (Fig. II33c) whereas the ones trending N70°E are associated with left-lateral motion (Fig. II33d). Because pull-apart structures are the most abundant, it is clear that these motions are the ones that are coeval with vein/fault formation. Indeed, the two systems, i.e. N/S and N70°E, are conjugated and consistent with a NE-SW shortening

direction (Fig. II34). Transtension is suggested because of the systematic association between wrench motion and normal ones.

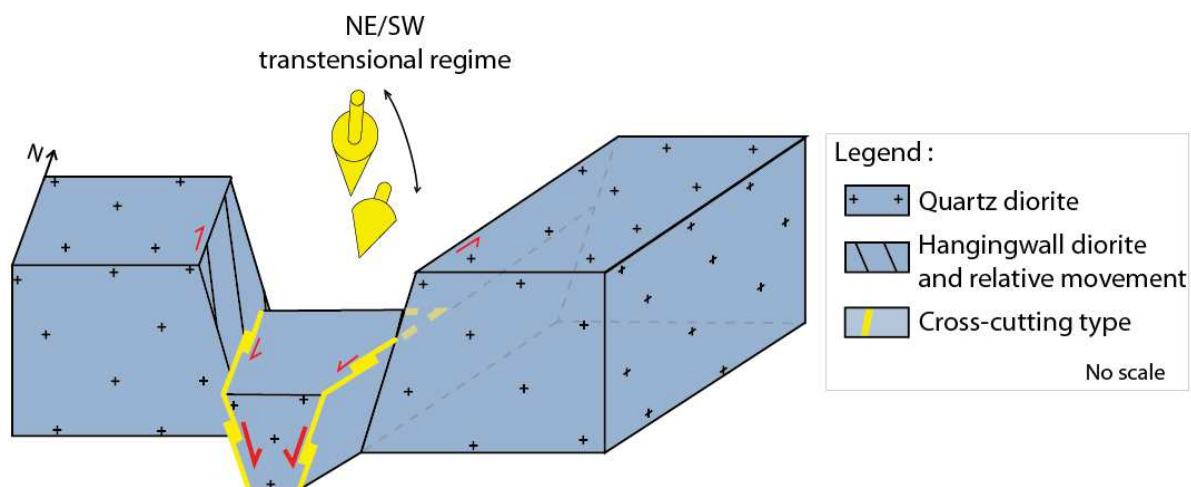


Figure II.34 : Schematic diagram explaining the conjugate character of the vein system at Bou Azzer. Conjugate veins in the horizontal planes and systematic normal motions in the vertical one allow defining a transtensional tectonic regime with a NE/SW shortening direction.

## 5. Mineralogical and textural description of the Bou Azzer ore deposit

Figure 35 summarizes the paragenetic sequence at Bou Azzer, taking into account all observations realised during this study (see below). Three main mineralisation stages have been distinguished and described below (Fig. II35). Textural features and relative abundance of elements (Co, Ni, Fe, As, and S) have been also added in order to emphasize the progressive association between arsenide mineral and carbonate gangue of each structure.

### 5.1 Mineralogy

The *quartz diorite* is mostly composed of albite, K-feldspar, apatite, quartz, oriented chloritised biotite and muscovite, rare epidote and zircon. Plagioclase, pyroxene and biotite exhibit a hypidiomorphic granular texture. Foliation is marked by muscovite and neoformed chlorite. Plagioclase is albitic in composition ( $Ab\# = 0.923-0.994$ ) and occurs as euhedral to subhedral grains exhibiting typical polysynthetic twins. Apatite appears as euhedral to rounded crystals showing for zonation and altered rims in CL images. Near the veins, apatite is spatially associated with chlorite and loellingite (Loel 1) in fractures.

The *serpentinites* at Bou Azzer, originally harzburgites and dunites, were formed during the Neoproterozoic orogeny (Leblanc, 1981; Bodinier et al., 1984; Gahlan et al., 2006). Serpentine composition corresponds to a mixture of lizardite and chrysotile, based on Raman micro-spectroscopy measurements (Appendix II.3). Serpentinite is composed of bastites showing the shape of pyroxene grains resisting to serpentinisation and associated pervasive carbonation. As reported by Fanlo et al. (2015), two types of spinels are commonly observed in the serpentinites: i) disseminated Cr-rich

spinel show margins discolouration of magnetite (Fig. II36b), ii) magnetite beds mostly located far from the massive mineralisation. Fibrous veins of chrysotile were observed at the contact with serpentinite and the massive mineralisation (Fig. II36b) suggesting that serpentinisation persists, at least during the first stages of mineralisation. Mineralisation was found within the serpentinite, close to the massive bodies (Fig. II36b). It consists in rammelsbergite (Ram) surrounded by nickeline (Nik 1). Its position within the serpentinite strongly suggests that the Ni-bearing minerals replace some former spinel grains (Fig. II36c). These minerals were fractured with voids filled by elongated serpentine aggregates (Fig. II36c), also suggesting that serpentinisation persists. Scarce sulfides (chalcopyrite, bornite, cobaltite) were also observed (Fig. II37a).

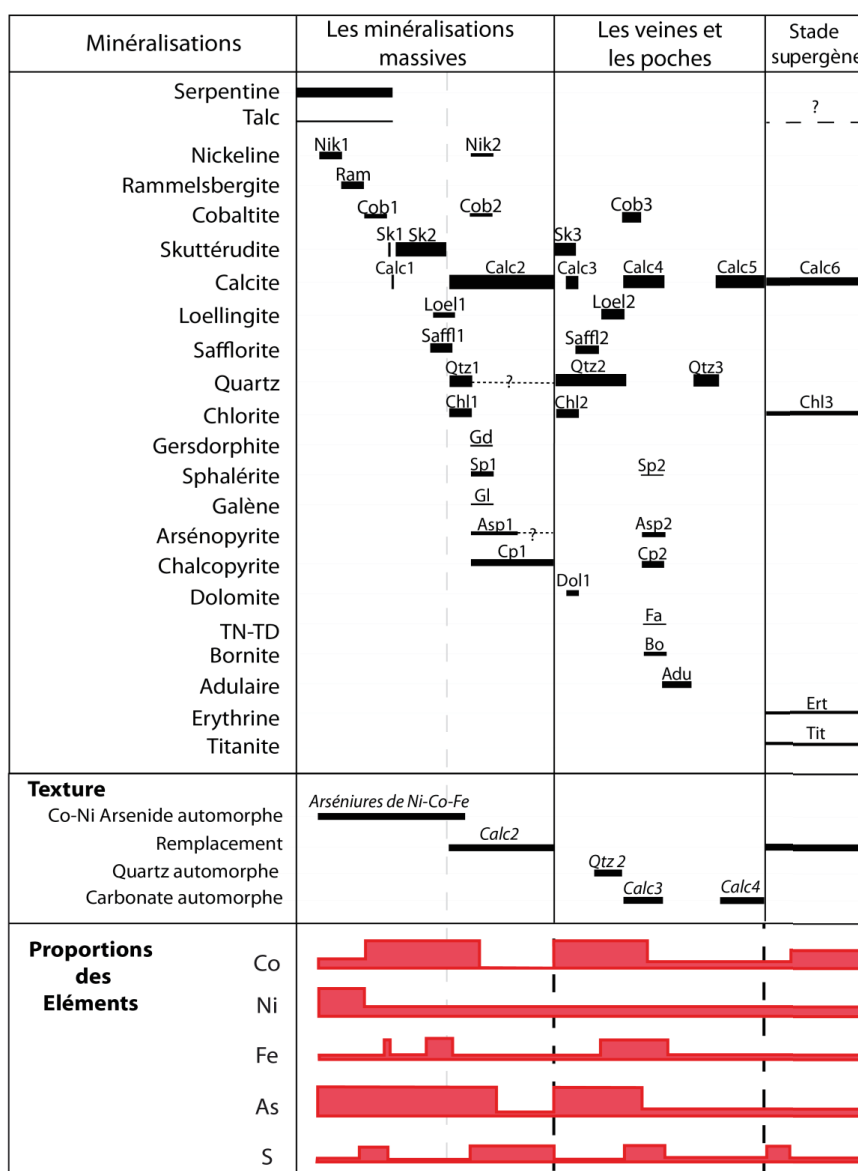


Figure II.35 : Paragenetic sequence of Bou Azzer ore deposit, associated textural characteristics and relative proportions of major metals and sulfur in the different structures (Adu: Adularia, As: Arsenic, Asp: Arsenopyrite, Bo: Bornite, Chl: Chlorite, Co: cobalt, Cob: Cobaltite, Cp: Chalcopyrite, Cr: Chromium, Dol: Dolomite, Ert: Erythrine, Fe: iron, Gd: Gersdorphite, K: potassium, Loel: Loellingite, Ni: nickel, Nik: Nickeline, Ram: Rammelsbergite, S: sulphide, Saffl: Safflorite, Sk: Skutterudite, Sp: Sphalerite, Tn-Td: tennantite - tetrahedrite).

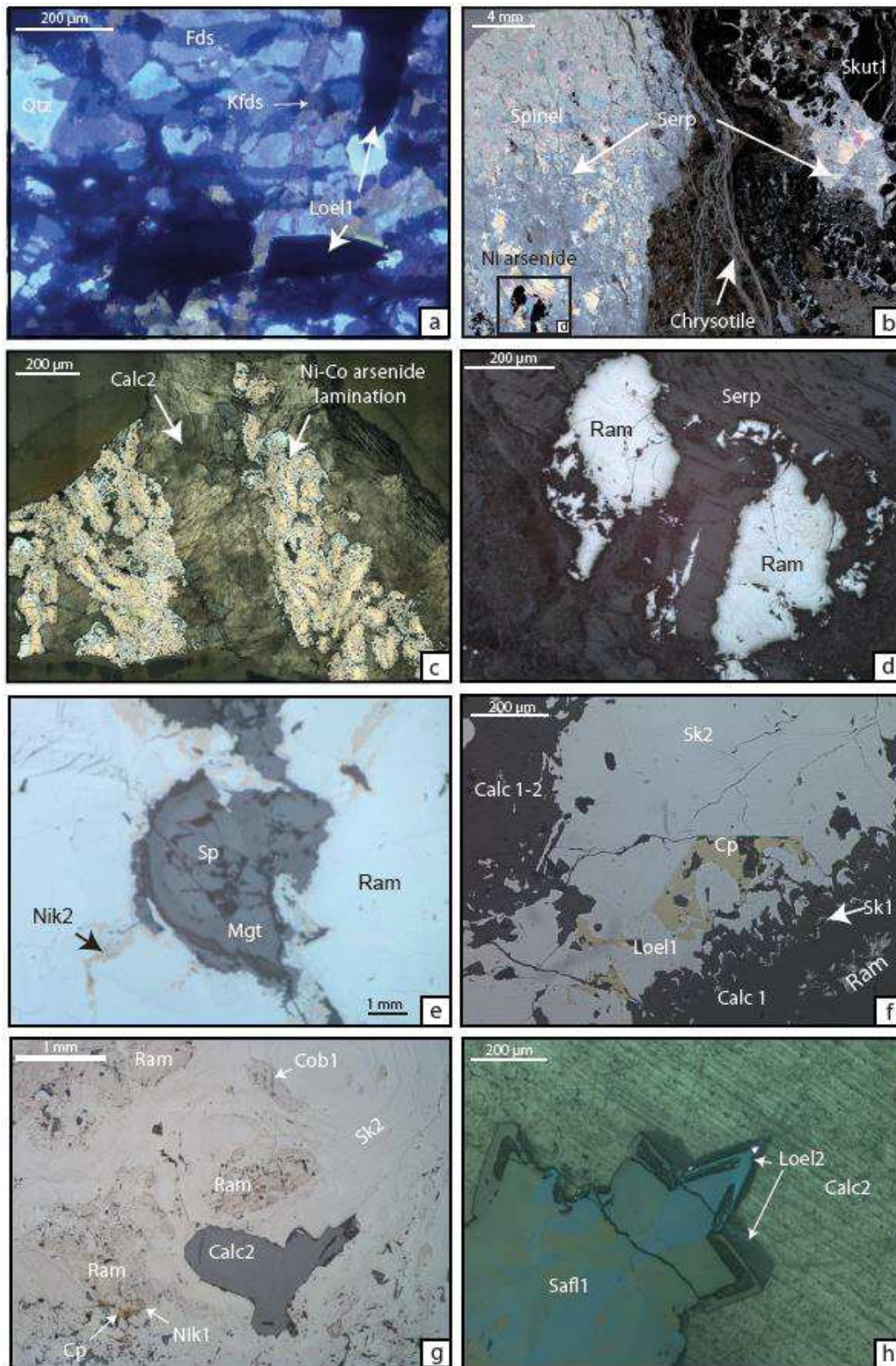


Figure II.36 : Mineral assemblages of the Ni-Co arsenide mineralisation at Bou Azzer: a) Quartz diorite composed of albite (Fds), quartz (Qtz) and fractured loellingite (Loel 1) by potassic feldspar (Kfds) (optical cathodoluminescence image - CL); b) Serpentinite near the massive mineralisation shows spinel which is sometimes entirely replaced by rammelsbergite (see rectangle and zoom in c). Within the massive body, skutterudite is also fractured and fill by serpentinite (see rectangle and zoom in h and d) (polarised light in air - PL); c) Laminated massive mineralisation (LMM) showing Ni-Co rich arsenide (nickeline, rammelsbergite, skutterudite, cobaltite) surrounding by levels of large crystal of calcite (Calc 1) and sphalerite (Sph); d) Isolated nuclei of rammelsbergite inside the serpentinite fractured with void filled by neofomed serpentine (image in reflected light, in air - RL); e) Disseminated spinel with

margin discoloration of magnetite affected by skutterudite (Skut 2) formation, followed by loellingite (Loel 2) and calcite (Calc 2); f) Fragmented feathery rammelsbergite (Ram) surrounded by skutterudite (Skut 2), calcite (Calc 1), infilling chalcopryrite (Cp) and prismatic to cloudy loellingite (Loel 1) setting up in a massive gangue of euhedral banded skutterudite (Skut 1) and calcite (Calc 2) (RL); g) Image in RL indicating a brecciated-related environment of the massive mineralisation (BRCM) by the presence of fragmented rammelsbergite surrounding by cobaltite (Cob 2) and skutterudite, calcite (Calc 1) and chalcopryrite (Cp); h) Growing of star-shaped safflorite (Saf1) on rammelsbergite (not visible on the photography), followed by loellingite (Loel 2) and large carbonate grain of the carbonated gangue (Calc 2) (RL, parallel Nicol). 5.2. Mineralogy of the Ni-Co ore

The massive Ni-Co ore bodies are characterised by two successive mineralisation stages:

- The early stage of Ni-arsenides consists of a first generation of nickeline (Nik 1) with rammelsbergite (Ram), certainly developed as replacement of spinel (Figs. II37b-c). Note that the monoarsenide (nickeline) crystalizes first followed by the diarsenide (rammelsbergite; Fig. 36d). When disseminated in serpentine, nickeline shows a higher #Co of 0.03 than grains from the massive mineralisation where #Co is 0.005 (Appendix II.2.1). However, rammelsbergite shows the same #Co if the mineral is disseminated in the serpentine or occurs in the massive mineralisation (#Co=0.27 and 0.24, respectively; Appendix II.2.2). Following the rammelsbergite deposition, the cobalt arsenide stage emplaced and is characterised by the association of a first generation of cobaltite (Cob 1) with small and prismatic skutterudite (Skut 1), followed by the first generation of calcite (Calc 1) (Figs. II36e-f and 37b-c).
- The second stage consists of a massive Co mineralisation. It is characterised by cobalt tri- and diarsenides such as large amount of dodecahedral skutterudite (Skut 2) and safflorite (Saf1; Fig. 36e-g). Using QEMSCAN analysis and X-ray elemental mapping, skutterudite grains show numerous growth bands due to important compositional variations becoming progressively Co-rich. Indeed, the core of the grains has a Ni-skutterudite composition ( $\text{Ni}_{0.75}\text{Co}_{0.25}\text{As}_{2.5}$ ) whereas the rims progressively acquire a more typical skutterudite composition ( $\text{Co}_{0.75}\text{Ni}_{0.25}\text{As}_{2.5}$ ; Fig. 37b-c). A negative correlation between  $\text{Ni}^{2+}$  and  $\text{Co}^{2+}$  indicates the substitution between the two cations (Fig. II38a). This figure reveals variable composition of cobalt and nickel between skutterudite (Skut 1) formed in the serpentinite and skutterudite (Skut 2) of the massive mineralisation. Skut 1 has high Co values (15.4-19.5 wt% Co) while Skut 2 shows lower contents (12.1-18.0 wt% Co; Appendix II.2.3). Skut 2 may therefore correspond to a progressive evolution of the mineralising system from Skut 1, highlighted by Skut 2 by a continuum from high Co content to Ni-Fe compositions (Fig. II38b).

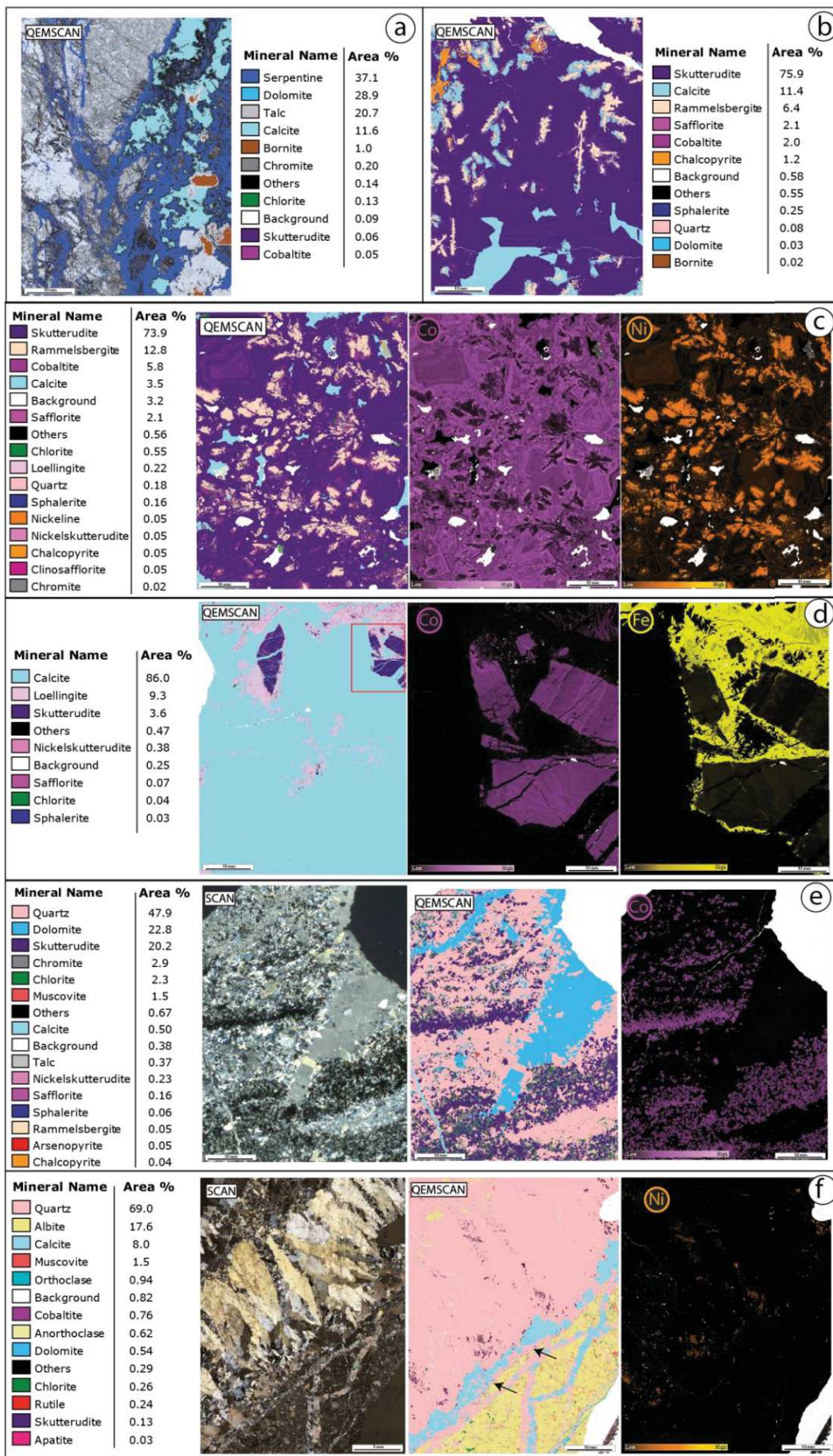


Figure II.37 : Automated mineralogy. a) QEMSCAN mineral map of serpentinite in contact with the contact type mineralisation at *Aghbar*. A strong talc alteration is observed in the left part of the sample (serpentinite), whereas a calcite impregnation is dominant in its right part (carbonated gangue of the mineralisation). Small (<2000  $\mu\text{m}$ ) spinel grains are preserved in the serpentinite whereas while they are replaced by large bornite grains, associated with skutterudite in the carbonate gangue. Cobaltite is disseminated in both part of the sample. b) QEMSCAN mineral map of the contact type mineralisation at *Filon 53*. Massive mineralisation mainly consists of skutterudite that develops around elongated rammelsbergite nodule, indicating that that the early mineralisation was formed by replacement of previous fragment, possibly of spinel (see text for explanation). Note that earlier carbonate can develop in contact with rammelsbergite and the final appearance of Cu-rich sulphides (i.e., chalcopyrite). c) QEMSCAN mineral map, Co and Ni element distribution maps from the contact type mineralisation at *Bouismass*. Skutterudite and rammelsbergite form zoned aggregates with oscillatory growth banding, marked by successive Ni-rich and Co-rich growth zones. Note that rammelsbergite forms isolated nucleus systematically surrounded by cobaltite and skutterudite. d) QEMSCAN mineral map of an ore sample from a cross-cutting border structure (*Bouismass*), with Co and Fe element distribution maps focused on skutterudite-loellingite relation. Skutterudite is fractured and Co/Ni growth bands are less marked than in skutterudite from the contact type mineralisation. Loellingite appearance is indicative of a Co/Fe transition. e) Transmitted-light image (xN) of contact type mineralisation at *Aghbar*, a QEMSCAN mineral map, showing textural relationship between skutterudite, spinel (spinel) and chlorite within a quartz gangue; and a Co map showing that skutterudite has Ni-rich core and Co-rich border. Note the late dolomite infill (sky blue colour on the QEMSCAN map). e) QEMSCAN mineral map, Co and Fe maps from the siliceous gangue of the contact type mineralisation at *Aghbar*. Here, Co-rich stage is represented by safflorite that post-date rare rammelsbergite grains. The late Fe-stage is illustrated by loellingite crystallisation around star-shaped safflorite (see Fe map). f) Transmitted-light image (xN), QEMSCAN mineral map, Co and Ni element distribution maps from *Filon 7/5* cross-cutting structure. Small skutterudites (black arrow) are associated with the early dolomite grains and show not detectable Ni content. Inversely, cobaltite related to comb-quartz has significant Ni proportion.

Two different gangue associations (siliceous and carbonated) host the massive mineralisation as defined below. Note that relationships between both the siliceous and carbonated gangue were not observed. The siliceous gangue is composed by a first generation of quartz (Qtz 1) and chlorite. It is composed also of Co-rich arsenide, chalcopyrite and is mostly observed in surface outcrops. The carbonated gangue is the most abundant.

Carbonated gangue is composed, besides of calcite, of disseminated spinels and laminated chlorite associated with cobalt and iron arsenides (Fig. II39a). Disseminated Cr-rich spinels show alteration halo of magnetite observed inside the carbonated gangue and around rammelsbergite as those located in the serpentinite (Fig. II39a). Most carbonates are calcite. Figure 38c shows a Mg-Fe-Mn diagram that integrates analyses from each structure. Calcite in the carbonated gangue shows an average of  $\#Mn = 0.46$ , with a homogeneous composition with Mg and Mn (see Appendix II.2.6 for data). Calcite composition from the surface “carapace” shows trend from the Mg end-member to pure Mn composition (Fig. II38c; location in Figs. 27, 28, 30 and 32). In the paragenetic evolution of the massive mineralisations at Bou Azzer, the Co-arsenide stage is followed by the Ni-arsenide one observed in serpentinite and in the gangue. Calc 2 shows a close link with Skut 2 as suggested by the co-crystallisation of Calc 2 in the core of the growth bands of Skut 2 (Fig. II39b). Then, Loel2 formed on the edge of safflorite (Saf1 2), representing what we called the iron stage (Fig. II36g). Loel2 shows also syn-crystallisation with Calc 2 that Skut 2. As well as rammelsbergite and skutterudite, Loel2 shows variation in Fe and Co (Fig. II37d). The base metal as assemblage consisting of sphalerite (Sl), chalcopyrite (Cp1), arsenopyrite (Asp1), galena (Gn), tenantite-tetrahedrite (Tn-Td), chalcocite (Cc) and digenite (Dg) in a carbonated gangue.

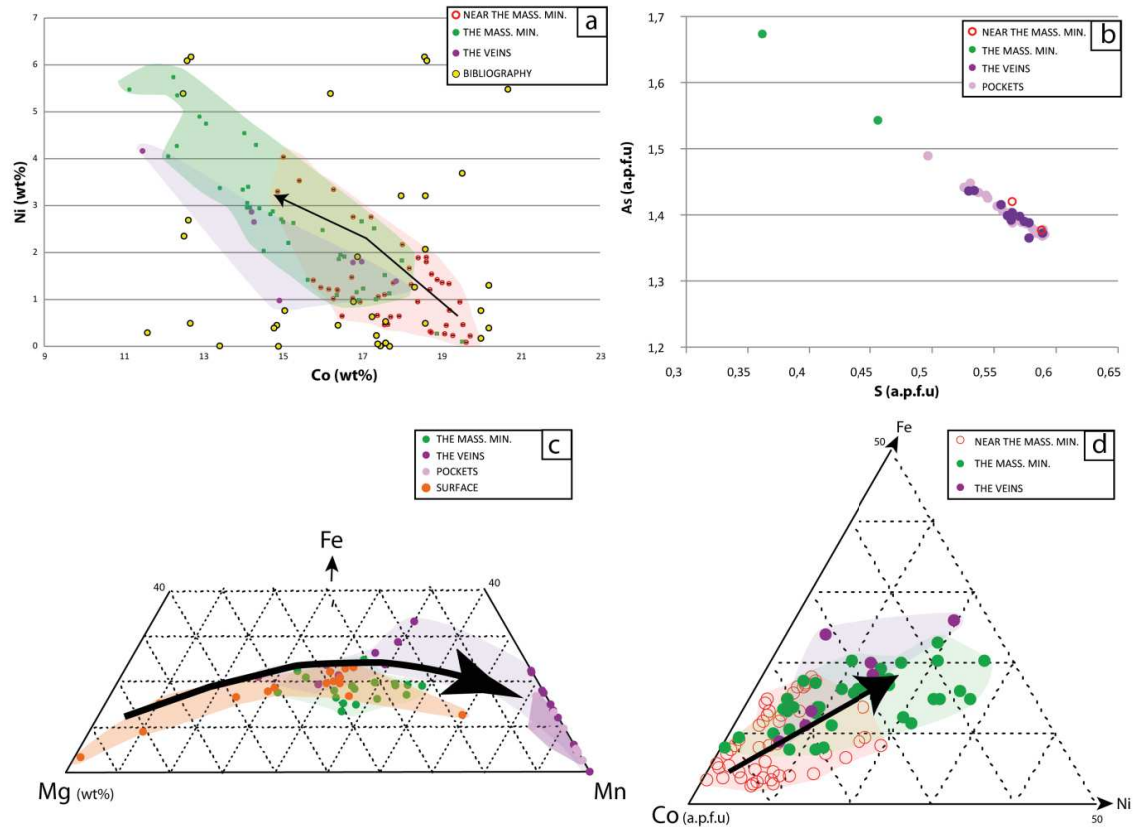


Figure II.38 : Ternary diagram of mineralisation from the serpentinite, the massive mineralizations, the veins system, the pockets and surface shells. a) Chemical composition of skutterudite with variation of Ni versus Co (wt%); b) Variation of As versus S of safflorite (a.p.f.u composition); c) Mg-Fe-Mn compositional diagram of calcites (a.p.f.u) d) Co-Fe-Ni composition diagram of skutterudite (a.p.f.u). (EPMA data) - error bars are 0.2 a.p.f.u for Co, 0.06 a.p.f.u for Ni.

Veins, intersecting massive mineralisation and quartz diorite (Fig. II6a), exhibit a complex infill with several successive stages. Infill is composed, first, of tiny to large hexagonal skutterudite (Skut 3) associated with an early dolomite generation (Dol1), calcite (Calc 3), large comb quartz (Qtz 3), cobaltite (Cob 3) and calcite (Calc 5) (Figs. II37e-f and 39c). Skut 3 has in general lower Co content compared to Skut 1 and Skut 2 (down to 11.47 wt% Co) but higher in Ni (up to 4.16 wt% Ni; Appendix II.2.3 and Fig. 38d). This is interpreted as a result of Ni-minerals crystallisation for the Skut 1 and Skut 2, and a decreasing of their Ni values; the contrary is valid for Skut 3. Disseminated and oriented cobaltite (Cob 3) grains with a N160°E trend were seen between comb quartz (Qtz 2) (Fig. II39c). Cob 3 also formed along the rim of Skut 3 and shows high Ni content around 5 wt% (Fig. II37f and Appendix II.2.4) even though Ni-rich arsenide has never been reported in the veins system of Bou Azzer. Star-shaped safflorite (Saf1 2) followed by prismatic loellingite (Loel 3) are then formed as a replacement of skutterudite (Skut 3). A second episode of veinlet formation showing euhedral adularia (Adu) forms parallel to the other albite/quartz veins (Figs. II37f and 39d). Calc 5 has a composition enriched in Mg and Mn (Fig. II38d), where #Mn is around 0.66, and is higher than those of massive mineralisation cropping out close to surface.



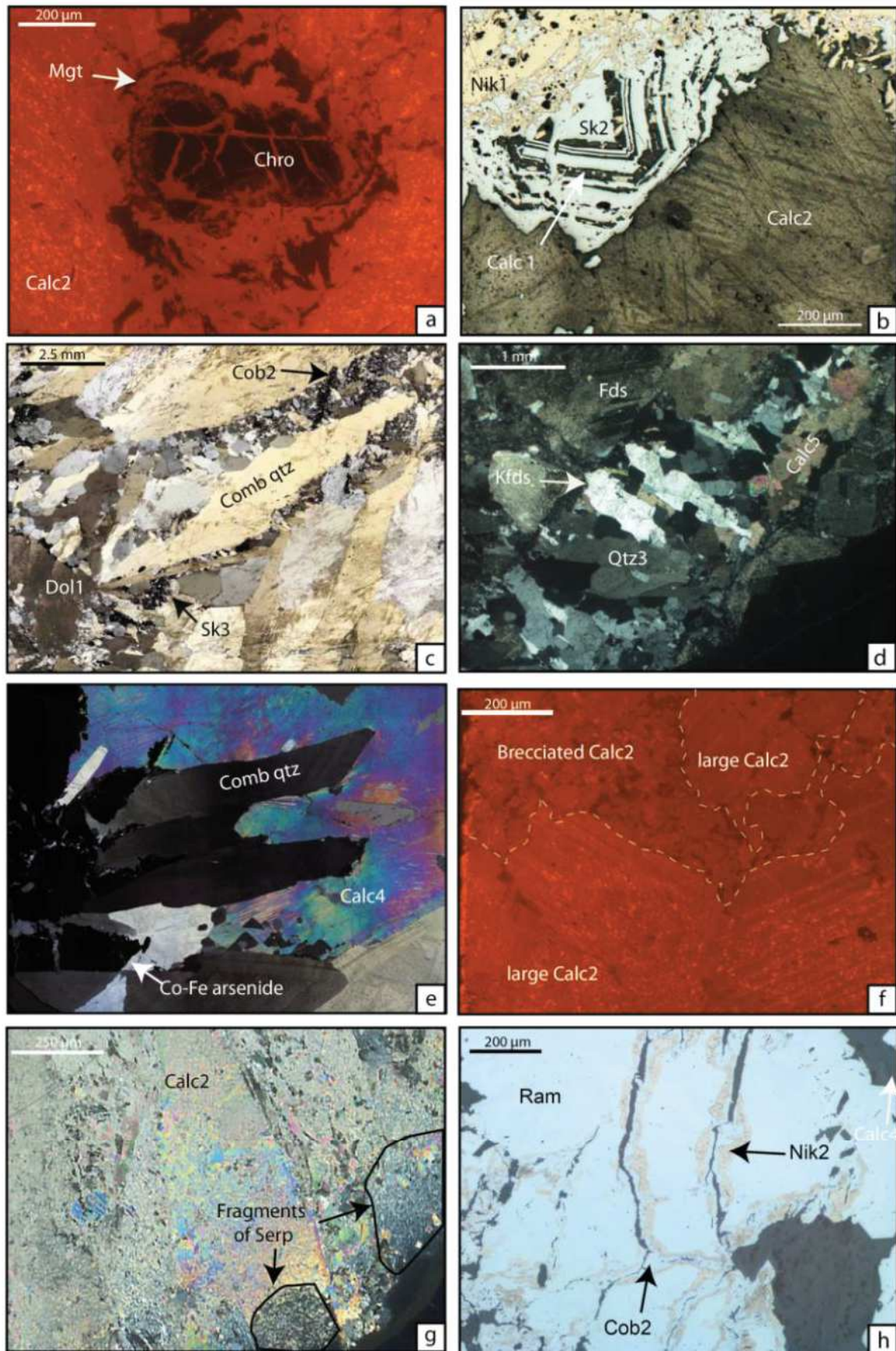


Figure II.39 : Thin section image of the carbonated mineralised gangue and the veins system. a) Optical-CL image of a spinel grain partially replaced by the carbonated gangue from the massive mineralisation. A margin discolouration of magnetite was defined by EPMA (Mt); b) Laminated nickeline (Nik 1) is surrounded by skutterudite (Skut 2)

which shows a syn-crystallisation with calcite (Calc 1) (image in RL); c) Skutterudite associated with dolomite (Dol1) and comb quartz in veins. Cobaltite (Cob 2) is supposed to form during a second stage between comb quartz (Qtz 2) and by replacement of skutterudite (Skut 3); d) Adularia (Adu) with an acicular shape forming along albite (Fds) - quartz (Qtz 3) - calcite (Calc 5) veins (image in PL); e) Geodic pockets texture exhibiting loellingite (Loel 3) and cobaltite (Cob 3) large minerals followed by comb quartz (Qtz 3) and large calcite (Calc 3-4) (image in RL and PL); f) Cold-CL image of carbonated gangue showing two types of texture: brecciated texture with thin carbonates and euhedral texture with large calcite (Calc 2); g) Fragments of a previous serpentinite in the carbonated gangue (Calc 2) (image in PL); h) Cobaltite (Cob 2) and nickeline (Nik 2) are formed as a replacement of fractured rammelsbergite (image in RL).

Geodic structures (pockets) were observed inside the massive mineralisation in gallery and on surface as open-space filling by quartz, carbonate and Co-Fe arsenide (Fig. II30d). Pockets are filled by the same arsenides and sulphides that those observed in the veins: e.g. sub-euhedral Skut 3 followed by aggregates of Saf13 and Loel 3 in a quartz/chlorite gangue. A comparison between loellingite in the quartz diorite, the massive mineralisation, the pockets and the veins is presented in figure 40. Loel 1 from the quartz diorite shows globally the higher Fe content (average at 26.4 %wt. of Fe) whereas loel2 from the massive mineralisation (average at 17.5 %wt. of Fe) and Loel 3 from veins and pockets show lower values (average Fe content between 22 and 25 % wt.; Appendix II.2.5). Quartz (Qtz 3) is followed by rhombohedral Calc 4 associated with Cob 3 and asp2 (Fig. II39e). Fragments of Loel 3 are observed in the gangue of carbonate (Calc 4), frequently in the middle of these structures (Fig. II30d). This gangue-related calcite has similar composition to calcite from the veins with typical high Mn content (average #Mn= 0.9; Fig. 38d).

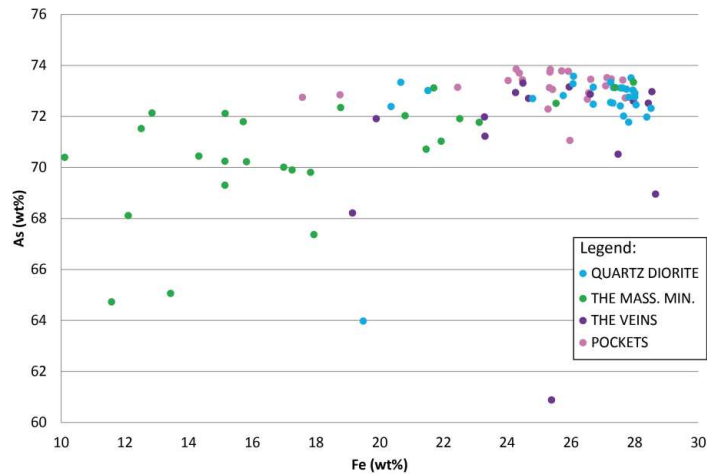


Figure II.40 : Fe versus As (in wt%) of loellingite in quartz diorite (light blue circle), massive mineralisation (green circle), vein system (purple circle) and in geodic pockets (pink circle).

### 5.3 Texture

Textural characteristics of the massive mineralisation, pockets and veins are indicated in the lower part of the figure 35. The main characteristics are the following:

- Massive mineralisation is represented by complex internal texture that seems related to replacement processes. Often, the earlier arsenides such as rammelsbergite mainly developed as a replacement of isolated spinel crystals as those within the serpentinite (Fig. II36b-c) or those in the core of the carbonated/siliceous gangue. In fact, rammelsbergite occurs as massive isolated (Fig. II36e), euhedral feathery and/or brecciated grains (Fig. II36-f). In all cases, the environment is filled by the complete paragenesis that includes massive Co-arsenide (Skut 2; Figs. 36e-f and 39a-e). In addition, minerals that crystallised after the first rammelsbergite generation (i.e., Skut 2, Saf12, Loel 1, Calc 2) exhibit typical euhedral shape certainly due to growth in an open space environment (Figs. II36e-f-g and 39b-f). Using optical-CL imagery, the carbonated gangue that hosts the arsenide reveal the coexistence of two alternating textures: i) large rhombohedral Calc 2 with clear cleavage and twinning without visible deformation (Fig. II39b-f), and ii) small, coarse grained with a jigsaw-like geometry, typical of brecciated domains (Fig. II39f). The formation of such textures is compatible with replacement of spinel and/or magnetite as precursors of Ni-rich minerals formation. The occurrence of large brecciated domains (Fig. II39f), confirmed by the serpentinite fragments (Fig. II30d) is here strongly suspected and will be discussed below (Brecciated Massive Mineralisation, BMM).
- Rarely, massive lenses of large crystal of Nik 1 surrounded by euhedral feathery texture of rammelsbergite and hexagonal skutterudite exhibit a laminated texture with alternating calcite rich layers (Calc 2) and arsenides-rich ones (Fig. II36d). These textures have been called here Laminated Massive Mineralisation (LMM) in opposition to the BMM.
- Few textures are also observed inside the serpentinite: i) rammelsbergite and Skut 2 are commonly fractured, with a serpentine infill (Fig. II36b-c-h); ii) several inherited fragments of serpentinite (Fig. II39g) and mesh texture of calcite using BSE imagery are observed in the carbonated gangue.
- Infill texture of mineralisation in open-space characterizes the veins. Qtz 3 which starts the formation of veins shows comb texture formed during the opening of the veins (Fig. II39c). Associated to comb-quartz 3, Cob 2 shows a compatible texture with a potential growth toward the vein centre. Calcite from the veins can occur as massive rhombohedral large grains (Calc 4) or, at contrary, as tiny veinlet of Calc 5 which fracture the quartz diorite. Fragments of the surrounding diorite were observed

inside the veins. Fracturing of apatite, chlorite and loellingite has been observed in the quartz diorite along the vein contacts.

- The pockets are only observed inside the massive mineralisation. They also show open-space filling textures with large and centimetric comb-quartz (Qtz 3) associated with Co-Fe arsenide formed along the quartz (Fig. II39e). Calc 3 of the pockets shows two types of textures: large rhombohedral texture and smaller fragmented calcite. Some fragments of Loel 3 are also fractured by Calc 3 and then, associated with Qtz 3 grains formation.

#### **5.4 Alteration**

Alteration of the quartz diorite is common and consists in an intense chloritisation, a complete albitisation of all feldspars, an epidote-rich alteration forming green fractures spatially associated with the massive mineralised structures (Fig. II38d) and a late titanite/calcite alteration in the quartz diorite. At the contact between the serpentinite and the quartz diorite where no massive mineralisation is formed, a red and compact rodingite reaction was observed (see above and Fig. 3c). Serpentinite far from the ore deposit or in contact with the mineralisation shows some talc- and carbonate- related alteration. In the massive mineralisation, Ni and Co-arsenide (Cob 2, Nik 2 and Gd) has been observed as secondary mineral around fractured rammelsbergite and Skut 2 (Fig. II39h). Erythrine has been described by Leblanc (1975) as a supergene alteration of cobalt arsenide (Ert in Fig. 30).

## 6. Discussion

### 6.1 Main results

The main results of our structural, textural and mineralogical study of the Bou Azzer ore system are as follows:

1. We confirm the existence of two ore body types at Bou Azzer: i) the massive ore bodies representing Ni and Co-bearing mineralisation, and ii) the veins systems with only Co mineralisation. Nickel is present only within the first type by the occurrence of rammelsbergite, nickeline and gersdorffite, as previously described by Leblanc (1975) and Ennaciri (1995). The massive bodies, meter-scale in size and trending N120°E, are distributed principally along the contact between serpentinite and quartz diorite (Fig. II28). The vein type mineralisation is NS to N070°E trending and cross the lithological contact of the Bou Azzer area. Mineralisation is present only within sections in contact with serpentinites and is mainly represented by cobaltite and skutterudite minerals. This setting is the one presently used for exploitation purposes in the Bou Azzer deposit by the CTT mining Company, as illustrated in figure 28.
2. The system evolves from Ni-rich-(Co-Fe) in the massive bodies to Co-rich-(Ni-Fe) mineralisation in the cross-cutting veins. Because this evolution is found within both systems, we propose that, even if massive bodies are formed first, continuity may exist between the processes responsible for the formation of massive and vein mineralisations at Bou Azzer. In both systems, the mineralogical succession is the one established in figure 35 and can be summarised as follow: i) an arsenide Ni-rich stage with rammelsbergite/nickeline developed specifically within the massive bodies, ii) an arsenide Co-rich stage forming late in the massive bodies evolution and at the beginning or as a main stage of the vein system, iii) a final stage with Cu-Fe sulphides observed in both systems.
3. Massive mineralisation is composed by the carbonated gangue, the siliceous gangue and the metallic bodies. The metallic parts are decimetre-scale elongated bodies parallel to the lithological/tectonic contact between serpentine and the hanging wall lithology (quartz diorite or Upper Complex volcanic rocks) whereas gangue forms lenses with complex morphology surrounding the massive bodies.
4. The gangue texture reflects the fact that these lenses are certainly former brecciated bodies with numerous residual fragments of serpentinite that have been observed at surface, underground and also at microscopic scale. A significant point is that serpentinine does not occur only as fragments but also as veins, fractures (Figs. II36b-h) and fibres between fragmented rammelsbergite (Fig. II36c). This clearly demonstrates that serpentinisation process persist at least during the early stages of the gangue formation and of the mineralisation.

5. Texture of the massive bodies can be separated in two types (Figs. II36c-d-e-f):
  - a. The most common with isolated lamellar rammelsbergite grains encapsulated within the paragenetic succession with, successively, Calc 1, Skut 1, Cob 1, Cp1;
  - b. Rarely, laminated textures are observed with alternating layers of lamellar nickeline and automorphic Calc 2. Here as well, Ni-rich minerals are surrounded by carbonate 1, cobaltite and skutterudite until the Fe sulphide stage such as loellingite and chalcopyrite.

The coexistence of these two textures is further used as significant criteria for understanding the formation model of the Bou Azzer mineralisation (see below).
6. The vein system exhibits internal textures resulting from the mode of formation associated with tectonics. Veins are associated with sinistral or dextral motions according to their orientation (Figs. II30 and 34c-d) and a normal motion is systematically observed within vertical plane of observation. This indicates the existence of a strong tectonic control during vein formation certainly within a transtensive tectonic setting.
7. Vein mineralogy differs from the one of the massive bodies by the absence of Ni-rich arsenides. Skutterudite and cobaltite form the main economic minerals here also followed by the crystallisation of safflorite, loellingite and late sulphides (mainly chalcopyrite and arsenopyrite). Gangue is essentially formed by abundant quartz, carbonate and accessory chlorite and K-feldspar.
8. Formation of meter-scale pockets in core of the massive mineralisation is attributed to the second stage responsible for vein formation. These pockets are mainly characterised by large euhedral calcite that form 90% of the structure but mineralisation (quartz, skutterudite, safflorite, loellingite and cobaltite) is found either at the border or in central position of the pockets.
9. Finally, we demonstrate that the two main units that form the host rocks, i.e. serpentinite and quartz diorite, are weakly affected by alteration processes.

Within the quartz diorite, the main effects are the following:

- The existence of thin fractures surrounded by epidote has been observed at the vicinity of massive and vein mineralisation of Bou Azzer East (see location in Figs. 28 and 34a). They have been attributed to a high temperature effect certainly contemporaneous to the quartz diorite emplacement and cooling.
- Dissemination of metallic minerals and specifically loellingite close to the vein type mineralisation. Because these minerals are fractured by K-feldspar vein associated with vein mineralisation (Fig. II36a), their formation within the quartz diorite is supposed to be earlier than vein formation.

Within the serpentinite, the alteration effects are:

- Close to the massive bodies, serpentinite looks poorly affected by a carbonate alteration and exhibit a green colour characteristic of fresh serpentinite. A strong carbonate alteration is suspected to exist in parts of the serpentinite not in contact with the massive mineralisation. This observation is difficult to confirm at depth.
- Also close to the massive bodies, spinel minerals are transformed into magnetite along their border but sometimes, they are totally replaced by rammelsbergite minerals.
- No particular effect has been observed in relation with vein mineralisation but also because vein and serpentinite are rarely in contact as illustrated in figure 30. The vein system, particularly well-developed within the quartz diorite, disappears and evolves into thin fractures when crossing the serpentinite.

## 6.2 Model of formation

Taking into account the main above exposed results, we propose an integrated model of formation for the Co-Ni mineralisation in the Bou Azzer deposit that explains the emplacement of both types of mineralisation within a single and continuous process and takes into account all observations made during this work (Fig. II41). All indications in red within this figure 41 are interpretations whereas the ones in black are observations.

1. The geological and tectonic setting that prevails during mineralisation processes is herein constructed. We will demonstrate in the following model that this setting plays a significant role for the mode of formation and for the geometrical/morphological constraints of the various mineralisation styles in the district. Only the case of massive mineralisation developed at the contact between serpentinite and quartz diorite is presented although the model can function for the two mineralisation styles. It has been demonstrated that massive mineralisation occurs in the core of a gangue in which serpentinite fragments subsist. It is then concluded that a pre-existing fault zone and its associated breccia can represent the initial stage as illustrated in figures 41a and 41a1. Indeed, we supposed an initial coexistence of laminated (mylonitic zone of the fault) and brecciated parts of the pre-existing fault. We also suppose that some parts of the brecciated level can contain fragments of the quartz diorite and that spinel and magnetite are also present. Some domains with open space between fragments are also supposed to exist and represented in white in Figure 41a.

2. The first stage consists of hydrothermal fluid invasion that preferentially percolated along the lithological/tectonic contact and preferentially within the highly porous brecciated area (Fig. II41b). It is unknown if the fluid arrived from the upper or lower part of the system. Both possibilities are presented in figure 41b (white arrows). During this stage, the two types of massive mineralisation were formed, i.e., the Laminated Massive Mineralisation (LMM) within mylonitic parts of the serpentinite and the Brecciated Massive Mineralisation (BMM) within the other parts. Figure 41b1

gives the microscopic details revealing that first rammelsbergite and nickeline form by replacement of the spinel fragments and the magnetite concentrations. Serpentinisation was still on-going at least during the earlier stages of this event as evidenced by the observation of serpentine veinlets that cross-cut earlier Ni-minerals such as rammelsbergite (Fig. II36b-c). Chrysotile veins also form all along the contact between serpentinite and mineralisation. During the following stage (Fig. II41b2), massive mineralisation precipitates around the earlier rammelsbergite and nickeline and forms the massive bodies. Successive crystallisation of calcite, cobaltite and skutterudite surrounds the rammelsbergite lamellar crystals (Fig. II36f). This ends with the precipitation of large euhedral calcite that forms the principal carbonate gangue (Fig. II41b2). We suspect that siliceous gangue was formed following a similar process but within parts dominated by quartz diorite fragments. Final crystallisation of sulphides and Fe-As-rich minerals is also observed, developed within both the massive bodies and associated gangue, but also in the quartz diorite.

3. The late mineralisation stage was formed by the emplacement of the NS to NE-SW veins (Fig. II41c). A complex infill is observed and the main mineralisation is represented by skutterudite fragments (Fig. II41f) and/or small cobaltite crystals formed in the core of vein-related comb quartz grains. Veins are structurally controlled as illustrated by their sigmoidal shape and the texture of the infill (comb quartz grains, breccia fragments). As for the first stage, this event ended by the crystallisation of sulphides and Fe-As rich minerals both within the veins but also in the host quartz diorite. In parallel with vein formation, the development of meter-scale pockets is observed (Fig. II41c). These pockets were formed in the core of the carbonated gangue of the massive mineralisation (Fig. II31d). The infill is comparable to that of the veins and exhibits, from the edge to the centre, skutterudite 2, large euhedral quartz and carbonate (that composed 90% of the structure) and finally, safflorite, loellingite and the late Fe-rich sulphides. In our model, the pockets are developed in favour of pre-existing zone of voids left between fragments of the initial breccia (see Figure 41a). The formation of these pockets in parallel with the vein is a good evidence for the persistence of the extensional context (or transtensional) during the late stages of mineralisation, fact confirmed by the domination of open-style features such as euhedral quartz and carbonate crystallisation.

Consequences of this integrated model are multiple. Because of the similarities between each paragenetic evolution, both types of mineralisation are approximately coeval and at least, a very short time exists between the formation and deposition of the two structures. Effectively, excepting the Ni-rich stage that characterised early massive mineralisation, the paragenetic evolution is quite similar with successive Ni-Co-Fe arsenide, Co-Fe sulfo-arsenide and final Fe-rich sulphides. The only divergence is textural thus indicating drastically different mode of formation as suggested in Figure 41. The fact that vein systems are only mineralised in the vicinity of the massive bodies is additional evidence. This can only result from the persistence of fluid-rock interaction during vein formation and demonstrates that vein form immediately during or after massive bodies. The fact that a late fault,



parallel to the ones that control vein emplacement (see Figure 28), passes across the entire Bou Azzer inlier but does not concentrate mineralisation, confirms this assumption. The hypothesis that massive mineralisation is developed at favour of pre-existing breccia zones explains the presently observed geometry of the different massive mineralisation bodies with a lot of small scale discontinuous deposits. The consequences for the exploration/exploitation strategy of the CTT mining company are significant and the necessity to account for some discontinuous and dispersed deposits is confirmed.

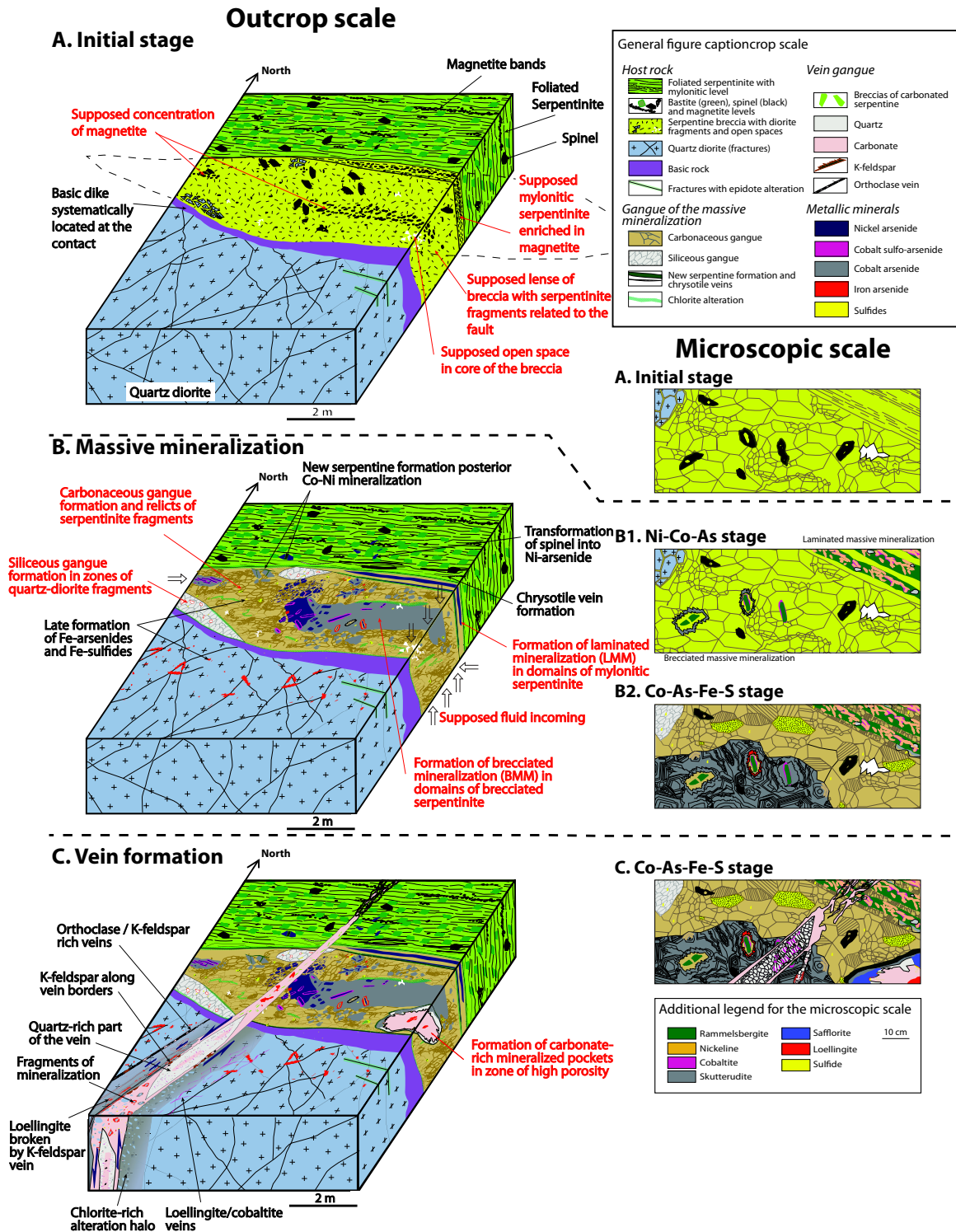


Figure II.41 : Evolution of the Bou Azzer Co-Ni mineralisation over time. a) Stage 1: The massive mineralisation is composed of elongated Ni-arsenide followed by a Co-stage with euhedral skutterudite, star-shaped safflorite in a previously serpentinite gangue. b) Stage 2: Fe-arsenide, Co sulfo-arsenide and base metal elements are formed associated with a carbonated gangue of the massive mineralisation. An in situ formation of euhedral minerals on previously brecciated serpentinite is observed in the massive mineralisation. Fragments of serpentinite are still visible in the gangue. c) Stage 3: The vein system is composed of Co and Fe arsenide, Co sulfo-arsenide and base metal sulphides

### 6.3 Tectonic and geodynamic setting

One of the main results of our study is the establishment of an initial context that can explain the specificity of the Bou Azzer mineralisation. Because of the preservation of numerous serpentinite fragments, we assume that previously to the mineralisation, brecciated zones with subsequent permeability may form in domains that are after that transformed into the massive and associated gangue mineralisations. Because these breccias occur under as elongated pluri-meter-scale lenses systematically developed at the contact between the serpentinite and other units (mainly the quartz diorite one), we suggest that they can correspond to some pre-existing fault-related polymictic sedimentary breccias developed along fault slope as already suggested in the case of the French Pyrenees (Clerc et al., 2012). Indeed, these breccia outcrops can be compared to the famous opihicalcite lithologies defined as brecciated and fractured peridotites with a carbonate matrix (Clerc et al., 2012) as illustrated in figure 42. In the case of Bou Azzer, it is then proposed that the location in which massive mineralisation will develop is defined as tectonic contacts. LMM and BMM types of mineralisation are then formed during the same time but depending on the position within the fault context and on the initial texture, as illustrated in figure 41b.

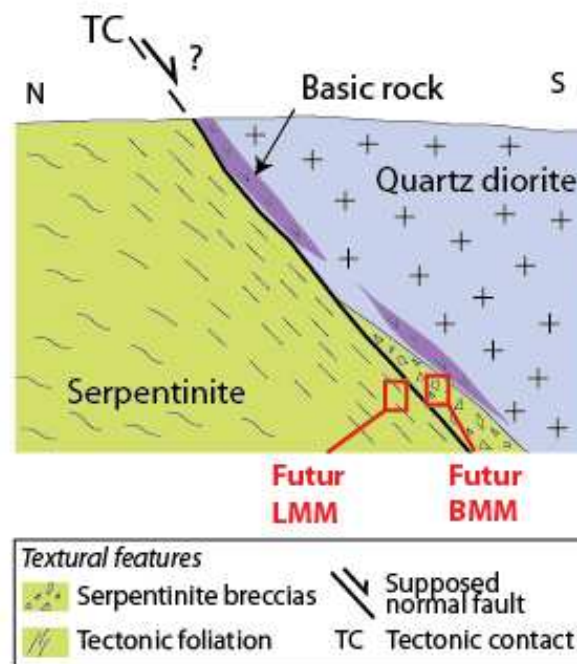


Figure 42 : Example of hypothetical tectonic context consistent with the formation of serpentinite breccia that serves as a trap for mineralisation. In such a scenario, fault motion needs to be normal. (BMM: Brecciated Massive Mineralisation; LMM: Laminated Massive Mineralisation)

The nature of the fault and consequently the type of context remains questionable. It is noteworthy that opihicalcite has been described mainly within extensional domains and specifically within area where mantle exhumation has been realised (Hölker et al., 2003, Lagabrielle and Bodinier, 2008; Caby et al. 2014). These rocks are finally intimately associated with the recent concept of a

mantle exhumation within extremely thinned continental margin and/or Oceanic Continent Transition (OCT). The demonstration of the nature of the tectonic contacts and the geodynamic setting of the Bou Azzer serpentinites exhumation is not the subject of this study and will be re-addressed in a paper in preparation. However, it can be suggested, as a preliminary idea, that such hyper extension can be developed in a back-arc position with respect to the geodynamic model proposed by Triantafyllou et al. (2018). This model suggested that a north-dipping subduction may form the Tazigzaout and Bougmane arcs, intensively affected by subsequent deformation in response to the NS trending compression. However, the lack of intensive deformation in the Bou Azzer parts where serpentinites are cropping out may suggest that such areas can be rather affected by hyper-extension that can explain the mantle exhumation helped by normal faults (Ishii et al., 1992; Jollivet et al., 2018).

If the formation of massive mineralisation can be considered as the result of replacement processes, the vein system appears clearly dependent on the tectonics. Syn-tectonic infill texture associated with transcurrent/normal faulting (Figs. II32 and 33) is the main argument. NS dextral and NE sinistral conjugated vein systems are consistent with a N030°E shortening direction, certainly associated with a vertical component explaining the systematic normal motion. Such a NE-SW shortening direction during transtensive tectonics has been already suggested by Tuduri et al. (2018), and particularly as controlling the final mineralisation stage in various deposits of the Jbel Saghro, during the upper complex formation. Several Au-Ag occurrences of the central Anti-Atlas of Morocco, i.e., the *Thaghassa* intrusion-related gold deposit, the *Qal'at Mgouna*, and *Zone des Dykes* gold indexes and the second stage of the *Imiter* silver mine are the main examples (Tuduri et al., 2018b).

The formation of the geodic textures in meter-scale pockets remains questionable. The mineralogical argument suggests that there are coeval with the vein system. They do not show any argument for structural control but there are clearly post-dating the massive mineralisation based on cross-cutting relationships. Such an open space environment, as already suggested by Ennaciri et al. (1997), is consistent with the transtensional character of the second mineralising event as discussed above. Moreover, it can be suggested that the geodic pockets can finally re-use and benefit from the high porosity and large open space that can exist in the slope-related breccia lenses that served as a trap for the massive mineralisation. Such open spaces are represented in the schematic petro-structural evolution of the deposit (Fig. II41).

#### **6.4 Mineralogical evolution**

It appears that both mineralisation types, the massive one and the veins, developed during a progressive and continuous stage as shown by the paragenesis sequence (Fig. II35). Each structure shows particular features that explain the hydrothermal control of mineralisation: i) Ni-Co mineralisation is developed by replacement of spinel/magnetite grains of the serpentinite host rock and previously serpentinitised mantle; ii) the “contact” type is formed by remobilisation of Co and Ni

from serpentinite, and As from diorite and serpentinite; iii) a strong carbonation of serpentinite is visible at surface outcrops and underground exposures (Leblanc, 1975; Ennaciri et al, 1995). The gangue is interpreted as a serpentinite transformed by a hydrothermal fluid along the contact between the quartz diorite and serpentinite; iv) large scale and euhedral shape of the minerals are indicative of a fluid flow in an open space environment; v) the combined hydrothermal and structural control of the veins is suggested by the remobilisation of Co-Fe-(Ni) in all mineralisation styles. However, only the vein system looks strongly tectonically controlled, i.e., the formation of the massive mineralisation seems dominated by replacement processes.

Hydrothermal leaching of the host rocks seems at the origin of the remobilisation of the economic elements such as Ni and Co, mainly from the ultramafic rocks (Laubier et al., 2014), Fe from diorite or oxides, As from serpentinite (Smedley et al., 2002) and maybe from the quartz diorite apatite (Baur and Onishi, 1969), base metal elements from meta-oceanic rocks or serpentinite (Alt, 1999; Leblanc and Fischer, 1990). Within the massive mineralisation, we have observed in this study a progressive decrease of the Ni/Co ratio with time, mainly expressed by the progressive decrease/increase of Ni and Co amount, respectively, within the banded growths of skutterudite and rammelsbergite (Fig. II11).

Few mechanisms can explain this observation: i) foreign ion partitioning (Morse and Bender, 1990) of trace elements in fluid environment; ii) influence of dislocation structure and impurity distributions of mineral surface (Paquette and Reeder, 1995; Smolksy et al., 1999); iii) fluctuations of growth conditions (supersaturation, growth temperature, pressure or pH) (Chernov, 1984; Smith, 1999); or iv) the partitioning (or sorption) of elements from aqueous solutions onto mineral surfaces (Smith, 1999). Nickel and cobalt have a better affinity with Fe-oxide (magnetite, spinel and spinel) and silicates from ultramafic rocks (Hart and Davis, 1978; Richter et al., 2006; Laubier et al. 2014). The promiscuity of nickel arsenide during skutterudite formation will change the composition in nickel and cobalt of the banded growth explained by the partitioning of Ni/Co onto mineral surfaces. Moreover, the  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  and  $\text{Fe}^{2+}$  ionic elements have similar ionic radius ( $\text{Fe}^{2+}$ : 55 pm  $\text{Co}^{2+}$ : 65 pm,  $\text{Ni}^{2+}$ : 69 pm) and thus can be easily interchanged in order to explain the replacement of magnetite-rich spinel by Ni- and Co-rich arsenide in presence of rich in As fluid phase.

In that case, we have also to question about the source and origin of the large amount of arsenic necessary to form the Bou Azzer arsenide ore deposit. Smedley et al. (2002) made a compilation about the source of arsenic in minerals and rocks (Appendix II.5). Arsenic can be concentrated in minerals such as Fe-oxide, apatite and magnetite but also in ultramafic, sedimentary or intermediate igneous rocks (diorite, granodiorite). Various works already underlined the exceptional arsenic concentration in Bou Azzer minerals and rocks. Following the authors, fibrous magnetite (concentration up to 400 ppm), magnetite disseminated grains or veins (< 20 ppm), sulphide in

serpentinite (50 to 1000 ppm), Neoproterozoic granitoid intrusions (< 10 to ~ 25 ppm), serpentinite (200 ppm), and volcanic rocks of the Ouarzazate supergroup (100 to 300 ppm) (Leblanc, 1975; Gahlan et al., 2006; Leblanc and Fischer, 1990; Beraaouz et al., 2004; Paquez, 2017, Leblanc and Billaud, 1982, respectively). Because adsorption of arsenic in Fe oxide is strong and As<sup>3+</sup> can substitute easily with Si<sup>4+</sup>, Al<sup>3+</sup>, Fe<sup>4+</sup>, Ti<sup>4+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Co<sup>3+</sup>, and maybe S<sup>4+</sup> (Smedley et al., 2002) these minerals and rocks can be excluded as a potential As source. However, and principally because the excess of As is expressed within mineralisation that occurs as a replacement of serpentinite breccia fragments (this study) and because it has been also demonstrated in this work that Ni and Co-rich arsenide minerals developed as a replacement of relictic spinel partially bordered by magnetite (Fig. II13e; Fanlo et al. 2015), the serpentine and all accessory minerals inside are the best candidate as source for As at Bou Azzer. Spinel and magnetite fragments can form the massive mineralisation (BMM or LMM) whereas serpentinite ones may have been used to form the gangue (Fig. II15).

The occurrence of K-feldspar was observed along vein borders but also in fractures parallel to the vein system. The disseminated loellingite in the quartz diorite is fractured by these K-feldspar veins. Two options are considered explaining the relationship between the host rock and the Co-Ni mineralisation: i) loellingite (Loel 1) would correspond with those in the veins and the geodic pockets because of the same iron and arsenic composition (Fig. II15), ii) loellingite could be fractured by K-feldspar from a magmatic-hydrothermal origin.

### 6.5 Discussion of the deposit age

There is a disagreement about the age of the Bou Azzer ore deposit. Oberthür et al. (2009) reported an age of 308 - 310 Ma for carbonate and brannerite, respectively, associated with molybdenite. Levresse (2001) published an <sup>40</sup>Ar/ <sup>39</sup>Ar age of 218 ± 8 Ma on adularia from *Filon 7/5* linked to the silver mineralisation (Essarraïj et al., 2005). Dolansky (2007) has also published geochronology data for brannerite from *Filon 7/5* vein system having a range of ages from 383 ± 7 Ma to 257 ± 8 Ma, i.e. during the late Devonian. These ages could also indicate the timing of remobilisation process during the Hercynian orogeny. At the opposite, Neoproterozoic to Precambrian ages of the Bou Azzer ore deposit were given by Ennaciri et al. (1997) with a Pb/Pb age of 510 ± 10 Ma on a single brannerite. Therefore, Leblanc (1975) estimates the age of Bou Azzer mineralisation after the B1 deformation, based on general arguments.

Applying the data obtained in this study and specifically the fact that both types of mineralisation seem to develop in continuity (mineralogical arguments), it is strongly suggested here that the Bou Azzer mineralisation was formed during the same tectonic event and certainly during the Neoproterozoic. The tectonic context that prevailed during vein formation is similar to the second

transtension stage that has been defined and demonstrated recently by Tuduri et al. (2018b) as a major tectonic event that affects the Jbel Saghro, more to the N-NE. In that case, the formation of earlier massive mineralisation could have taken place only during the early Proterozoic, fact that is consistent with the intervention of hyper-extension in response to the north-directed subduction suspected southward of the Bou Azzer deposit (Triantafallou et al., 2016).

### **6.6 Deposit classification and consequences on exploration strategy**

The Bou Azzer ore deposit has been considered recently as a five-element vein type deposit by Markl et al. (2016) and Burisch et al. (2017). The five-element vein type deposits (Bi-Co-Ni-Ag-U) have open-space infill characterised by two specific mineral associations: Co-Ni sulphides and Co-Ni arsenides, with or without dendritic to wire-like texture of native element silver, arsenic and bismuth in a carbonate gangue. They are related to hydrothermal processes affecting various rocks of sedimentary, igneous, metamorphic origin. Few genetic theories of five-element vein type deposits are proposed by Kissin (1992); one of them is related to hydrothermal-magmatic model occurring in the continental crust and associated with extensional tectonics. The mineral association and ore textures are rather good characteristics for these deposits although they show various environment of formation, temperature of formation or fluid salinity. As an example, the Ag-Tizi ore deposit of Bou Azzer, hosted in quartz/carbonate veins or disseminated in the quartz diorite, located in a restricted ore zone near the rodingitic contact between the serpentinite and the quartz diorite has similarities with the five-element vein type deposits. However, a lot of questions subsist. Even if the late Ag-Hg stage clearly takes place after the Co-As and base metal stages (Leblanc and Lbouabi, 1988; Ennaciri et al., 1997; Essaraj et al., 2005), the age of their formation and the genetic link with the Bou Azzer Co-Ni mineralisation remain uncertain. According to Leblanc and Lbouabi (1988) and Ennaciri et al. (1997), the Ag-ore stage linked to the Co-ore stage is formed during the major Pan-African tectonic phase (680 Ma). Recently, Essaraj et al. (2005) suggested that the late Ag-stage is linked to extensional tectonics by brines circulation from evaporitic levels and this, around 216-203 Ma. According to this study and even if the Ag stage was not observed, it could be linked to the end of the mineralisation stage or to a late stage of alteration as presented in the paragenetic sequence (Fig. II9).

Indeed, the age determination of the Co-Ni Bou Azzer mineralisation remains an open question despite the numerous studies devoted to this deposit. Because our study demonstrates that at least the massive part of the mineralisation was formed by hot fluid circulation in an extensional setting related to magmatic activity, it seems clear that the model of formation may resemble to that of VHMS deposits. Moreover, replacement processes have been recently highlighted in model of VHMS formation (Aerden, 1993, Doyle and Allen, 2003, Relvas et al., 2000). Indeed, and in spite of the occurrence of Co-Ni mineralisation and the lack of abundant polymetallic sulphides, we can tentatively suggest that the Bou Azzer deposit may correspond to a genetic model close to the one of the VHMS but with formation of arsenides rather than sulphides. The drastic divergence between the

two end-members, i.e. sulphide vs. arsenides, can be explained only by the implication of mantle rocks in the second case. Indeed, we propose that the Bou Azzer deposit is a Massive Arsenides deposit instead of a Massive Sulphide one. The term “Volcanic Hosted” can be replaced, in our case, by “Serpentinite Hosted” and the acronym used could be SHMA, Serpentinite Hosted Massive Arsenide. In this model, the distribution of the previous breccia lenses is the most important fact in order to explain the distribution of massive mineralisation lenses. This may explain why the Bou Azzer deposit is composed of numerous, isolated, small-size, ore bodies rather than a continuous and regular mineralisation.

## 7. Conclusion

Based on new field, structural, textural, petro-structural and geochemical arguments, we propose in this work to attribute to the Co-Ni Bou Azzer deposit to a new alternative model of formation that we can call SHMA, Serpentinite Hosted Massive Arsenides. In our model, several lines of evidence argue for this new classification. Because the massive part of the deposit is formed by circulation of hydrothermal fluids across a serpentinite breccia formed during tectonic exhumation by low-angle extensional detachment, the model of formation is similar to the one of VHMS except the fact that basement rocks are serpentinites and not volcanic or oceanic crust. The significance of replacement process is an additional argument for explaining their mode of formation. The presence of intrusive rocks and exhumed mantle transformed in serpentinite (source of Ni and Co) is essential to achieve the formation of this new type of deposit.

**Acknowledgements** Managem and CTT mining companies are acknowledged for their financial supports during field works and access to the mine sites. MANAGEM provide entire field trip costs for J.T., K.K. and S.S whereas part of the field trip of E.T. and A.C. are provided by the European program MEDYNA. Part of the laboratory works was supported by the TelluS Program of CNRS/INSU and the PHC Campus Germaine de Steel, other part by particular funds provided by A.C. Christophe Nevado and Doriane Delmas are particularly acknowledged for their meticulous works on thin sections.

## References

- Admou, A., Razin, Ph., Egal, E., Youbi., N., Soulaïmani, A., Blein, O., Chèvre-Mont, Ph., Gasquet, D., Barbanson, L., Bouabdelli, M., Anzar-Conseil, 2013, Notice explicative, carte géol. Maroc (1/50000). Notes et Mémoires Serv. Géol. Maroc N°533bis, MEM/BRGM, carte géologique par Admou, A., Fekkak., A., Razin, Ph., Egal, E., Youbi., N., Soulaïmani, A., Blein, O., Baudin, T., Chèvre-Mont, Ph. (2013)
- Aerden D. G. A. M. (1991) Foliation-boudinage control on the formation of the Rosebery Pb-Zn orebody, *Tasmania Journal of Structural Geology*, 13, No 7, 759-775
- Aerden D. G. A. M. (1993) Formation of Massive Sulphide Lenses by Replacement of Folds: The Hercules Pb-Zn Mine, *Tasmania Economic Geology*, 88, 377-396



- Ahmed, A. H., Arai, S., and Ikenne, M., 2009, Mineralogy and paragenesis of the Co-Ni arsenides ores of Bou Azzer, Anti-Atlas, Morocco: *Econ. Geol.*, 104, 249–266.
- Arndt, N.T., Leshner, C.M., Czamanske, G.K., 2005. Mantle-derived magmas and magmatic Ni-Cu-(PGE) deposits, in: Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., Richard, J.P. (Eds.), *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, pp. 5-23.
- Barbey, P., Oberli, F., Burg, J. P., Nachit, H., Pons, J., and Meier, M., 2004, The Paleoproterozoic in western Anti-Atlas (Morocco): A clarification: *Journal of African Earth Sciences*, 39, 239–245.
- Bastin, E.S., 1939. The nickel-cobalt-native silver ore type. *Econ. Geol.* 34, 1-40.
- Baur, W.H., and Onishi, B.-M.H., 1969, Arsenic, In: Wedepohl, K.H. (Ed) *Handbook of Geochemistry*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 33-A-1–33-0-5.
- Beraouz, E. H., Ikenne, M., Mortaji, A., Madi, A., Lahmam, M., Gasquet, D., 2004, Neoproterozoic granitoids associated with the Bou-Azzer ophiolitic melange (Anti-Atlas, Morocco): Evidence of adakitic magmatism in an arc segment at the NW edge of the West-African craton: *Journal of African Earth Sciences*, 39, 285–293.
- Blein, O., Baudin, T., Chèvremont, P., Soulaïmani, A., Admou, H., Gasquet, P., Cocherie, A., Egal, E., Youbi, N., Razin, P., Bouabdelli, M., Gombert, P., 2014. Geochronological constraints on the polycyclic magmatism in the Bou Azzer-El Graara inlier (Central Anti-Atlas Morocco). *J. Afr. Earth. Sci.* 99, Part 2, 287-306.
- Bodinier, J. L., Dupuy, C., and Dostal, J., 1984, Geochemistry of Precambrian ophiolites from Bou Azzer, Morocco: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 87, 43–50.
- Boillot, G., Recq, M., Winterer, E.L., Meyer, A.W., Applegate, J., Baltuck, M., Bergen, J.A., Comas, M.C., Davies, T.A., Dunham, K., Evans, C.A., Girardeau, J., Goldberg, G., Haggerty, J., Jansa, L.F., Johnson, J.A., Kasahara, J., Loreau, J.P., Luna-Sierra, E., Moullade, M., Ogg, J., Sarti, M., Thurow, J., Williamson, M., 1987. Tectonic denudation of the upper mantle along passive margins: a model based on drilling results (ODP leg 103, western Galicia margin, Spain). *Tectonophysics* 132, 335-342.
- Borisenko, A. S., Lebedev, V. I., Borovikov, A. A., Pavlova, G. G., Kalinin, Y. A., Nevol'ko, P. A., ... Kostin, A. V., 2014, Forming Conditions and Age of Native Silver Deposits in Anti-Atlas (Morocco). *Doklady Earth Sciences*, 456, 663–666.
- Bouchta, R., Boyer, F., Routhier, P., Saadi, M., Salem, M., 1977, L'aire cuprifère de l'Anti-Atlas (Maroc) : Permanence et arêtes riches : *C. R. Acad. Sc. Paris*, 284, 503–506.
- Bourque, H., Barbanson, L., Sizaret, S., Branquet, Y., Ramboz, C., 2014, Copper Mineralisation in Adoudounian Cover of the Bou Azzer-El Graara (Anti Atlas, Morocco): *Tectono-Stratigraphic Controls*, 2, 3–6.
- Bousquet, R., El Mamoun, R., Saddiqi, O., Goffé, B., Möller, A., Madi, A., 2008. Mélanges and ophiolites during the Pan-African orogeny: the case of the Bou-Azzer ophiolite suite (Morocco): *Geological Society, London, Special Publications*, 297, 233-247.
- Burisch, M., Gerdes, A., Walter, B., Neumann, U., Fettel, M., Markl, G., 2017, Methane and the origin of five-element veins: Mineralogy, age, fluid inclusion chemistry and ore forming processes in the Odenwald, SW Germany: *Ore Geology Reviews*, 81, 42-61.
- Burkhard, M., Caritg, S., Helg, U., Robert-Charrue, C., Soulaïmani, A., 2006. Tectonics of the Anti-Atlas of Morocco. *C. R. Geosci.* 338, 11-24.
- Butt, C.R.M., Cluzel, D., 2013. Nickel Laterite Ore Deposits: Weathered Serpentinites. *Elements* 9, 123-128.
- Caby, R., 2014. Nature and evolution of Neoproterozoic ocean-continent transition: Evidence from the passive margin of the West African craton in NE Mali. *Journal of African Earth Sciences*, 91, 1–11.

- Cailteux, J.L.H., Kampunzu, A.B., Lerouge, C., Kaputo, A.K., Milesi, J.P., 2005. Genesis of sediment-hosted stratiform copper–cobalt deposits, central African Copperbelt. *J. Afr. Earth. Sci.* 42, 134-158.
- Clerc, C., Lagabrielle, Y., Neumaier, M. Reynaud, J.Y., Saint Blanquat, M., 2012, Exhumation of subcontinental mantle rocks: evidence from ultramafic-bearing clastic deposits nearby the Lherz peridotite body, French pyrenees: *Bull. Soc. géol.* n°5, 443-459
- Cannat, M., 1993. Emplacement of mantle rocks in the seafloor at mid-ocean ridges. *J. Geophys. Res.-Solid Earth* 98, 4163-4172.
- Chernov, A.A., 1984, *Modern Crystallography III. Crystal growth*: Verlag Berlin Heidelberg, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 488 p.
- Choubert, G., 1945, Sur le Précambrien marocain: *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 221, 249-251.
- Choubert, G., 1963a, Histoire géologique du Précambrien de l'Anti-Atlas : *Notes Mem. Serv. Géol. Maroc*, 162, 352 p.
- Clauer, N., 1976, Géochimie isotopique du strontium des milieux sédimentaires – application à la géochronologie de la couverture du craton Ouest-Africain: *Sci. Géol. Mém.*, v. 45, 256 p.
- Deschamps, F., Godard, M., Guillot, S., Hattori, K., 2013. Geochemistry of subduction zone serpentinites: A review. *Lithos* 178, 96-127.
- Dolansky, L.M., 2007, Controls on the genesis of hydrothermal cobalt mineralisation: Insights from the mineralogy and geochemistry of the Bou Azzer deposits, Morocco: Unpublished M.Sc. thesis, Montreal, Canada, McGill University, 192 p.
- El Ghorfi, M., Oberthür, T., Lüders, V., El Boukhari, A., Melcher, F., Maacha, L., Ziadi, R., Baoutoul, H., 2006, Gold–palladium mineralisation at Bleïda Far West, Bou Azzer–El Graara Inlier, Anti-Atlas, Morocco. *Mineralium Deposita*, 41, 549-564
- El Hadi, H., Simancas, J. F., Martínez-Poyatos, D., Azor, A., Tahiri, A., Montero, P., Fanning, C.M., Bea, F., González-Lodeiro, F., 2010, Structural and geochronological constraints on the evolution of the Bou Azzer Neoproterozoic ophiolite (Anti-Atlas, Morocco): *Precambrian Research*, 182, 1-14.
- Ennaciri, A., 1995, Contribution à l'étude du district à Co, As, (Ni, Au, Ag) de Bou Azzer, Anti-Atlas (Maroc). Données minéralogiques et géochimiques : Etude des inclusions fluides : Unpublished M.Sc. thesis, Université d'Orléans, 238 p.
- Ennaciri, A., Barbanson, L., Lancelot, J., and Touray, J.C., 1996, Distribution et âge de mise en place des minéralisations aurifères du district de Bou Azzer) (Anti-Atlas, Maroc) [ext. abs.l: Réunion des Sciences de la Terre, 16th, Orléans, 1996, Extended Abstracts, 153.
- Ennaciri, A., Barbanson, L., Touray, J. C., 1997, Brine inclusions from the Co-As(Au) Bou Azzer district, Anti-Atlas mountains, Morocco: *Economic Geology*, 92, 360–367.
- Ennaciri, A., Barbanson, L., and Touray, J.C., 1995b, Mineralised hydrothermal solution cavities in the Co-As Aït Ahmane mine (Bou Azzer, Morocco): *Mineralium Deposita*, 30, 75- 77.
- Ennih, N., Liégeois, J., 2001. The Moroccan Anti-Atlas : the West African craton passive margin with limited Pan-African activity . Implications for the northern limit of the craton. *Precambrian Research* 112, 289–302.
- Epp D. and Suyenaga W., Thermal contraction and alteration of the oceanic crust, 1978 *geology*, 6, 726-728
- Essarraj, S., Boiron, M.-C., Cathelineau, M., Banks, D. A., Benharref, M., 2005, Penetration of surface-evaporated brines into the Proterozoic basement and deposition of Co and Ag at Bou Azzer (Morocco): Evidence from fluid inclusions. *Journal of African Earth Sciences*, 41, 25–39.

- Fanlo, I., Gervilla, F., Colás, V., Subías, I., 2015. Zn-, Mn- and Co-rich chromian spinels from the Bou-Azzer mining district (Morocco): Constraints on their relationship with the mineralising process. *Ore Geology Reviews* 71, 82–98. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.05.006>
- Francis, T.J.G. 1981, serpentinisation faults and their role in the tectonics of slow spreading ridges, *Journal of geophysical research*, 86, 11616-11622
- Freyssinet, P., Butt, C.R.M., Morris, R.C., Piantone, P., 2005. Ore-forming processes related to lateritic weathering, in: Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., Richard, J.P. (Eds.), *Economic Geology 100th Anniversary Volume*. Society of Economic Geologists, Inc, Littleton, Colorado, 681-722.
- Gahlan, H., Arai, S., Ahmed, A.H., Ishida, Y., Abdel-Aziz, Y.M., and Rahimi, A., 2006, Origin of magnetite veins in serpentinite from the Late Proterozoic Bou-Azzer ophiolite, Anti-Atlas, Morocco: An implication for mobility of iron during serpentinisation: *Journal of African Earth Sciences*, 46, 318–330.
- Gasquet, D., Levresse, G., Cheilletz, A., Azizi-Samir, M.R., Mouttaqi, A., 2005, Contribution to a geodynamic reconstruction of the Anti-Atlas (Morocco) during Pan-African times with the emphasis on inversion tectonics and metallogenic activity at the Precambrian-Cambrian transition: *Precambrian Research*, 140, 157-182.
- Gervilla, F., Fanlo, I., Colas, V., Subias, I., 2012. Mineral composition and phases relation of Ni – Co – Fe arsenides ores from the Aghbar mine, Bou Azzer, Morocco. *The Canadian mineralogist*, v. 50, p. 447–470.
- Guillot, S., Hattori, K., Agard, P., Schwartz, S., Vidal, O., 2009. Exhumation processes in oceanic and continental subduction contexts: a review. In: Lallemand, S., Funiciello, F. (Eds.), *Subduction Zone Geodynamics (Frontiers in Earth Sciences)*. Springer Berlin, Heidelberg, pp. 175–205.
- Hart, S. R., and Davis, K. E., 1978, Nickel partitioning between olivine and silicate melt: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 40, p. 203–219.
- Hattori, K.H., Guillot, S., 2003. Volcanic fronts as a consequence of serpentinites dehydration in the fore-arc mantle wedge. *Geology* 31, 525-528.
- Hattori KH, Guillot S, Saumur BM, Tubrett MN, Vidal O, and Morfin S (2010) Corundum-bearing garnet peridotite from northern Dominican Republic: A metamorphic product of an arc cumulate in the Caribbean subduction zone. *Lithos* 114: 437–450.
- Hefferan, K.P., Admou, H., Karson, J.A., Saquaque, A., 2000. Anti-Atlas ( Morocco ) role in Neoproterozoic Western Gondwana reconstruction. *Precambrian Research* 103, 89–96.
- Hein, J.R., Koschinsky, A., 2014. 13.11 - Deep-Ocean Ferromanganese Crusts and Nodules A2 - Holland, Heinrich D, in: Turekian, K.K. (Ed.), *Treatise on Geochemistry (Second Edition)*. Elsevier, Oxford, pp. 273-291.
- Hitzman, M.W., Broughton, D., Selley, D., Woodhead, J., Wood, D., Bull, S., 2012. The Central African Copperbelt: Diverse stratigraphic, structural, and temporal settings in the world's largest sedimentary copper district, in: Hedenquist, J.W., Harris, M., Camus, F. (Eds.), *Geology and Genesis of Major Copper Deposits and Districts of the World: A Tribute to Richard H. Sillitoe*. Society of Economic Geologists, Littleton, Co, pp. 487-514.
- Hölker, A., Manatchal. G., Holliger, K., Bernoulli, D., 2003, Tectonic nature and seismic response of top-basement detachment faults in magma-poor rifted margins *TECTONICS*, VOL. 22, NO. 4, 1035
- Ildefonse, B., Blackman, D.K., John, B.E., Ohara, Y., Miller, D.J., MacLeod, C.J., 2007. Oceanic core complexes and crustal accretion at slow-spreading ridges. *Geology* 35, 623-626.

- Inglis, J. D., Lemos, R. S. D., Samson, S. D., Admou, H., 2005, Geochronological Constraints on Late Precambrian Intrusion, Metamorphism and Tectonism in the Anti-Atlas Mountains: *The Journal of Geology*, v. 113, p. 439–450.
- Ishii, T., Robinson, P.T., Maekawa, H., Fiske, R., 1992. Petrological studies of peridotites from diapiric serpentinite seamounts in the Izu–Ogasawara–Mariana Forearc, Leg 125. In: Fryer, P., Pearce, J.A., Stokking, L.B., et al. (Eds.), *Proceeding of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, vol. 125, pp. 445–485
- Kissin, S.A. 1988 nickel-cobalt-native silver (five-element) veins: a rift-related ore type, in Kisvarsanyi, G. and Grant. SK eds, proceedings volume, north American conference on tectonic control of ore deposits and the vertical and horizontal extent of ore systems: university of Missouri-rolla, rolla, Mo. P. 288-279
- Kissin, S.A., 1992, Five-element (Ni-Co-As-Ag-Bi) veins: *Geosci Can*, 19, 113–124.
- Lagabrielle, Y., Bodinier, J.L., 2008. Submarine reworking of exhumed subcontinental mantle rocks: Field evidence from the Lherz peridotites, French Pyrenees. *Terra Nova* 20, 11–21. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2007.00781.x>
- Latham, A.J., and Riding, R., 1990, Fossil evidence for the location of the Precambrian-Cambrian boundary in Morocco: *Nature*, v. 344, p. 752–754.
- Laubier, M., Grove, T.L., Langmuir, C.H., 2014, Trace element mineral/melt partitioning for basaltic and basaltic andesitic melts: An experimental and laser ICP-MS study with application to the oxidation state of mantle source regions: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 392, p. 265-278.
- Laurent Jolivet, Armel Menant, Camille Clerc, Pietro Sternai, Nicolas Bellahsen, Sylvie Leroy, Raphaël Pik, Martin Stab, Claudio Faccenna, Christian Gorini., 2018 Extensional crustal tectonics and crust-mantle coupling, a view from the geological record *Earth-Science Reviews* 185 (2018) 1187–1209
- Leblanc, M., 1972, Sur le style disharmonique des plis hercyniens à la base de la couverture dans l'Anti-Atlas central : *Acad. Sci. Paris C.R.*, v. 275D, p. 803-806.
- Leblanc, M., 1975, Ophiolites précambriennes et gîtes arseniés de cobalt (Bou Azzer, Maroc): Unpublished M.Sc. thesis, University of Montpellier, 329 p.
- Leblanc, M., 1976, Proterozoic oceanic crust at Bou Azzer: *Nature*, v. 261, p. 34–35.
- Leblanc, M., 1981, The Late Proterozoic ophiolites of Bou Azzer (Morocco): evidence for Pan-African plate tectonics, In: A. Kröner (Editor), *Precambrian Plate Tectonics*. Elsevier, Amsterdam, p. 435-451.
- Leblanc, M., 1986, Co-Ni arsenide deposits, with accessory gold, in ultramafic rocks from Morocco: *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 23, p. 1592–1602.
- Leblanc, M., and Billaud, P., 1982, Cobalt arsenide orebodies related to an upper Proterozoic ophiolite: Bou Azzer (Morocco): *Econ. Geol.*, v. 77, p. 162-175.
- Leblanc, M., and Fischer, W., 1990, Gold and platinum group elements in cobalt arsenide ores: Hydrothermal concentration from a serpentinite source-rock: *Mineralogy and Petrology*, v. 42, p. 197–209.
- Leblanc, M., and Lbouabi, M., 1988, Native Silver Mineralisation along a Rodingite Tectonic Contact between Serpentinite and Quartz Diorite (Bou Azzer, Morocco): *Economic Geology*, v. 83, p. 1379–1391.
- Levrès, G., 2001, Contribution à l'établissement d'un modèle génétique des gisements d'Imiter (Ag-Hg), Bou Madine (Pb-Zn-Cu-Ag-Au) et Bou Azzer (Co-Ni-As-Ag-Au) dans l'Anti-Atlas marocain: Unpublished M.Sc. thesis, CRPG-CNRS, Nancy, France, 191 p.
- Maacha, L., Alansari, A., Saquaque, A., Soulaïmani, A., 2012, The Bou Azzer Cobalt-Nickel-Arsenic District: In *Les mines de l'Anti-Atlas, Maroc*, p. 91-97.

- Maacha, L., Elghorfi, M., Ennaciri, A., Sadiqqi, O., Soulaïmani, A., Alansari, A., Bhilisse, M., 2015, Nouvelles données isotopiques et d'inclusions fluides des minéralisations cobaltifères de Bou Azzer. Apport à la géologie économique de la boutonnière. (Anti-Atlas central, Maroc) : In Notes et Mémoires du service Géologique, 579, p. 133-139.
- Manatschal, G., 2004. New models for evolution of magma-poor rifted margins based on a review of data and concepts from West Iberia and the Alps. *International Journal of Earth Sciences* 93, 432–466. <https://doi.org/10.1007/s00531-004-0394-7>
- Manatschal, G., Engström, A., Desmurs, L., Schaltegger, U., Cosca, M., Müntener, O., Bernoulli, D., 2006. What is the tectono-metamorphic evolution of continental break-up: The example of the Tasna Ocean–Continent Transition. *J. Struct. Geol.* 28, 1849-1869.
- Manheim, F.T., Lane-Bostwick, C.M., 1988, Cobalt in ferromanganese crusts as a monitor of hydrothermal discharge on the Pacific sea floor. *Nature* 335, 59-62.
- Mark G. Doylea,\*, Rodney L. Allen, 2003, Subsea-floor replacement in volcanic-hosted massive sulfide deposits *Ore Geology Reviews* 23, 183–222
- Markl, G., Burisch, M., Neumann, U., 2016, Natural fracking and the genesis of five-element veins. *Mineralium Deposita*, v. 51, p. 703–712.
- Mével, C. 2003 Serpentinisation of abyssal peridotites at mid-ocean ridges *C. R. Geoscience* 335 825-852
- Mifdal, A., and Peucat, J.J., 1985, U-Pb and Rb-Sr dating of acidic volcanic rocks and Precambrian basement in Anti-Atlas of Morocco (Ouarzazate). Contribution for numerical dating of Precambrian-Cambrian boundary, In: *Sciences Géologiques. Bulletin*, 38, 185–200.
- Misra K.C.. 2000, Sediment-Hosted Massive Zinc-Lead Sulfide (SMS) Deposits. In: *Understanding Mineral Deposits*. Springer, Dordrecht, p450-495
- Missenard, Y., Zeyen, H., Frizon de Lamotte, D., Leturmy, P., Petit, C., Sébrier, M., Saddiqi, O., 2006, Crustal versus asthenospheric origin of relief of the Atlas Mountains of Morocco. *J. Geophys. Res.-Solid Earth* 111, B03401.
- Morse, J.W. and Bender, M.L., 1990, Partition coefficients in calcite: An examination of factors influencing the validity of experimental results and their application to natural systems: *Chem. Geol.*, 82, 265-277.
- Naldrett, A.J., 2005. A history of our understanding of magmatic Ni-Cu sulfide deposits. *Can. Mineral.* 43, 2069-2098.
- Oberthür, T., Melcher, F., Henjes-Kunst, F., Gerdes, A., Stein, H., Zimmerman, A., and El Ghorfi, M., 2009, Hercynian age of the Cobalt-Nickel-Arsenide-(Gold) ores, Bou Azzer, Anti-Atlas, Morocco, Re-Os, Sm-Nd, and U-Pb age determinations: *Economic Geology*, 104, 1065–1079.
- Ohmoto, H., and Skinner, B.J., 1983, The Kuroko and related volcanogenic massive sulfide deposits: *Economic Geology Monograph* 5, 604 p.
- Orloff, O., 1968, Etude géologique et géomorphologique des massifs d'ultrabasites compris entre Houailou et Canala (Nouvelle-Calédonie): Unpublished M.Sc. thesis, Université de Montpellier, France, 189.
- Ouguir, H., Macaudière, J., Dagallier, G., Qadrouci, A., Leistel, J. M., 1994, Cadre structural du gîte Ag-Hg d'Imiter (Anti Atlas, Maroc): implication métallogénique. *Bulletin de La Société Géologique de France*, v. 165, p. 233–248.
- Paquette, J., and Reeder, R. J., 1995, Relationship between surface structure, growth mechanism, and trace element incorporation in calcite: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 59, p. 735–749.

- Pirrie, D., Butcher, A.R., Power, M.R., Gottlieb, P., Miller, G.L., 2004, Rapid quantitative mineral and phase analysis using automated scanning electron microscopy (QEMSCAN); potential applications in forensic geoscience, In: Geological Society, London, Special Publication, v. 232, p. 123-136.
- Pouit, G., 1966, Paléogéographie et répartition des minéralisations stratiformes de cuivre dans l'anti-Atlas occidental (Maroc): *Chron Rech Min*, v. 356, p. 279-289.
- Righter, K., Leeman, W. P., Hervig, R. L., 2006, Partitioning of Ni, Co and V between spinel-structured oxides and silicate melts: Importance of spinel composition: *Chemical Geology*, v. 227, p. 1–25.
- Samson, S. D., Inglis, J. D., D'Lemos, R. S., Admou, H., Blichert-Toft, J., Hefferan, K., 2004, Geochronological, geochemical, and Nd-Hf isotopic constraints on the origin of Neoproterozoic plagiogranites in the Tasriwne ophiolite, Anti-Atlas orogen, Morocco. *Precambrian Research*, v. 135, p. 133–147.
- Saquaque, A., Admou, H., Karson, J., Hefferan, K., Reuber, I., 1989, Precambrian accretionary tectonics in the Bou Azzer-El Graara region, Anti-Atlas, Morocco: *Geology*, v. 17, p. 1107–1110.
- Skelton, A.D.L. and Valley, J.W., 2000, The relative timing of serpentinisation and mantle exhumation at the ocean-continent transition, Iberia: constraints from oxygen isotopes, *Earth and Planetary Science Letters* 178 327-338
- Smedley, P. L., and Kinniburgh, D. G., 2002, A review of the source, behaviour and distribution of arsenic: *Natural waters*, v. 17, p. 517–568.
- Smith, K. S. (1999). Metal Sorption on Mineral Surfaces: An Overview with Examples Relating to Mineral Deposits: Review in *Economic Geology*, v. 6A–6B, p. 161–182.
- Smolksy, I.L., Voloshin, A., Zaitseva, N., Rudneva, E., Klapper, H., 1999, X-ray topographic study of striation formation in layer growth of crystals from solutions: *Philosophical Transactions of The Royal Society B Biological Sciences*, v. 357, p. 2631–2649.
- Solomon, M. and Walshe, J.L., 1979, The formation of massive sulphide deposits on the sea floors. *Economic Geology*, v. 74, p. 797-813.
- Thomas, R.J., Fekkak, A., Ennih, N., Errami, E., Loughlin, S.C., Gresse, P.G., Chevallier, L.P., Liégeois, J.P., 2004, A new lithostratigraphic framework for the Anti-Atlas Orogen, Morocco: *Journal of African Earth Sciences*.
- Tornos F., 2000, Environment of formation and styles of volcanogenic massive sulphides: The Iberian Pyrite Belt *Ore Geology Reviews*, v. 28, p. 259–307
- Triantafyllou, A., Berger, J., Baele, J., Diot, H., Ennih, N., Plissart, G., Monnier, C., Watlet, A., Bruguier, O., Spagna, P., Vandycke, S., 2016, The Tachakoucht – Iriiri – Tourtit arc complex (Moroccan Anti-Atlas): Neoproterozoic records of polyphased subduction-accretion dynamics during the Pan-African orogeny: *Journal of Geodynamics*, v. 96, p. 81–103.
- Triantafyllou, A., Berger, J., Baele, J.M., Bruguier, O., Diot, H., Ennih, N., Monnier, C., Plissart, G., Vandycke, S., Watlet, A., 2018. Intra-oceanic arc growth driven by magmatic and tectonic processes recorded in the Neoproterozoic Bougmane arc complex (Anti-Atlas, Morocco). *Precambrian Research* 304, 39–63. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.10.022>
- Tucker, M. E., 1986, Carbon isotope excursions on Precambrian/Cambrian boundary beds, Morocco: *Nature*, v. 319, p. 48-50.
- Tuduri, J., 2005, Processus de formation et relations spatio-temporelles des minéralisations à or et argent en contexte volcanique Précambrien (Jbel Saghro, Anti-Atlas, Maroc) : Unpublished M.Sc. thesis, CNRS, Orleans, France, University of Orleans, p.

- Tuduri, J., Chauvet, A., Barbanson, L., Bourdier, J.-L., Labriki, M., Ennaciri, A., Badra, L., Dubois, M., Ennaciri-Leloix, C., Sizaret, S., Maacha, L., 2018a. The Jbel Saghro Au(–Ag, Cu) and Ag–Hg Metallogenetic Province: Product of a Long-Lived Ediacaran Tectono-Magmatic Evolution in the Moroccan Anti-Atlas. *Minerals* 8, 592.
- Tuduri, J., Chauvet, A., Barbanson, L., Labriki, M., Dubois, M., Trapy, P.-H., Lahfid, A., Poujol, M., Melleton, J., Badra, L., Ennaciri, A., Maacha, L., 2018b. Structural control, magmatic-hydrothermal evolution and formation of hornfels-hosted, intrusion-related gold deposits: Insight from the Thaghassa deposit in Eastern Anti-Atlas, Morocco. *Ore Geol. Rev.* 97, 171-198.
- Wafik, A., Admou, H., Saquaque, A., El Boukhari, A., Juteau, T., 2001, Cu-Fe sulfureous mineralisations and the associated alterations in the Bou Azzer and Khzama Proterozoic ophiolites, Anti-Atlas, Morocco: *Ofioliti*, 26, 47–62.
- Walsh, G. J., Benziane, F., Aleinikoff, J. N., Harrison, R. W., Yazidi, A., Burton, W. C., Quick, J.E., Saadane, A., 2012, Neoproterozoic tectonic evolution of the Jebel Saghro and Bou Azzer—El Graara inliers, eastern and central Anti-Atlas, Morocco: *Precambrian Research*, 216, 23–62.
- Youbi, N., Kouyaté, D., Söderlund, U., Ernst, R.E., Soulaïmani, A., Hafid, A., Ikenne, M., El Bahat, A., Bertrand, H., Rkha Chaham, K., Ben Abbou, M., Mortaji, A., El Ghorfi, M., Zouhair, M., El Janati, M., 2013. The 1750Ma Magmatic Event of the West African Craton (Anti-Atlas, Morocco). *Precambrian Research*, 236, 106–123

# **Chapitre III : Pétrographie et géochimie des inclusions fluides**





## **A. Introduction**

Le but de l'étude pétrographique, microthermométrie et géochimiques des inclusions fluides (appelées IFs dans ce manuscrit), présentes à la fois dans la gangue de quartz et de calcite des minéralisations massives, des veines et des poches, est de comprendre l'origine et les mécanismes contrôlant la mise en place des minéralisations de cobalt, de nickel et de fer de Bou Azzer. Ce travail s'est basé sur le modèle de formation et la séquence paragenétique des minéralisations de Bou Azzer présentée au chapitre précédent (Chap. II). Cependant, les inclusions fluides associées aux gangues de quartz et de carbonates lors des stades à nickel et à argent n'ont pas été étudiés. Le premier car les minéralisations sont comprises dans la serpentinite, ne permettant pas l'identification d'IFs. Le deuxième car le gisement argentifère de la mine de Bou Azzer n'a pas pu être étudié lors de l'étude pétro-structurale.

L'utilisation du microscope optique et de la cathodoluminescence permettra de déterminer de manière précise les différentes générations minérales, afin de cibler les zones propices à l'étude des inclusions fluides. L'analyse microthermométrie permettra de mesurer les températures de changement de phases d'une inclusion fluide piégée dans un cristal, de calculer la salinité et d'estimer les conditions thermodynamiques (pression-température) du système fluide. La spectrométrie Raman permettra de connaître la composition des phases liquides, vapeurs et solides piégées dans l'inclusion fluide. Enfin, les analyses en éléments traces et en métaux réalisées au laser LA-ICP-MS des fluides feront l'objet d'une étude détaillée afin de contraindre la nature du fluide impliqué dans la formation des minéralisations de Co-Fe de Bou Azzer. Les résultats obtenus permettront de répondre à la question sur la relation entre les minéralisations massives, les veines et les poches du point de vue de la chimie du fluide à l'origine des minéralisations métalliques et de gangues de Bou Azzer.

## **B. Méthodes analytiques**

### **1. Pétrographie des inclusions fluides**

Sept lames épaisses de 100  $\mu\text{m}$ , double polies, et mesurant 28 mm de large et 48 mm de long, ont été réalisées pour la pétrographie des inclusions fluides et pour l'analyse microthermométrie. La caractérisation détaillée des gangues en lien avec les minéralisations a été faite de l'échelle de l'affleurement jusqu'à celle de la lame épaisse et l'analyse pétro-structurale présentée dans le chapitre II. Les deux minéraux étudiés en lien avec les minéralisations massives, les veines et les poches de Bou Azzer contenant des inclusions fluides sont le quartz et la calcite. Aucune inclusion fluide n'a été observée dans la dolomite. Les lames minces ont été préparées à partir d'échantillons de roches sélectionnés sur le terrain dans les gangues des minéralisations massives, des poches et des veines exploitées à Bou Azzer (Tableau III.1). La réalisation des 7 lames épaisses a été faite au laboratoire de litholamellage des minéraux du laboratoire de Géosciences Montpellier à l'Université de Montpellier. L'utilisation du microscope optique du zoom x4 à x40 a permis de repérer les inclusions fluides

étudiées individuellement. Afin d'effectuer la pétrographie des inclusions fluides, il a été suivi les méthodes de pétrologie présentées par Van Den Kerkhof & Hein (2001) et Goldstein & Reynolds (1994). Cela a permis de déterminer les différents types d'inclusions fluides observées, ainsi que la relation entre ces dernières et leurs positions en fonction des critères de croissance des minéraux de gangues.

**Tableau III.1: Récapitulatif des lames épaisses étudiées à l'analyse des inclusions fluides dans les minéralisations massives, les poches et les veines**

ECHANTILLON	LOCALITE	NIVEAU	ENCAISSANT	STRUCTURE
BAE21b	Bouismass - P2	-390	Contact serp./Diorite quartzite	Min. massives
BAE46c	BAE - P6	-510	Contact serp./Diorite quartzite	Min. massives
BAE59a	Filon 53	-240	Contact serp./Diorite quartzite	Poche
BAE68f	Filon 53 - ST6	-240	Contact serp./Diorite quartzite	Poche
BAE3	BAE - P6	-510	Diorite quartzite	Veine
BAE70a	Filon 53 - ST5	-240	Diorite quartzite	Veine
BA51c	BAE - P6	-510	Diorite quartzite	Veine

## 2. Cathodoluminescence

La cathodoluminescence est causée par l'interaction entre un faisceau d'électrons et la surface d'un minéral qui va générer des électrons rétrodiffusés, secondaires ou des rayons X. Deux types de cathodoluminescence existent dans la détermination de ces paramètres, la cathodoluminescence dite froide, et la chaude ou associée à un MEB. La différence réside dans le faisceau d'électrons généré. Dans le MEB-CL, le faisceau est à balayage et focalisé, tandis que les microscopes à CL utilisent un faisceau défocalisé stationnaire. De plus, l'utilisation de l'optique à miroir dans les microscopes électroniques permet l'analyse de la région UV, alors que l'optique du verre dans les microscopes à CL absorbe la région de longueur d'onde inférieure à env. 380 nm (Götze & Kempe, 2008). La cathodoluminescence (CL) permet de visualiser les défauts de structures dans les minéraux ou matériaux étudiés, les zones de croissance, les textures, les différences de composition chimique ou la structure interne des objets étudiés. Ces défauts sont reliés à des défauts de matrice (impureté, trous, bord cassé) ou à l'incorporation de certains éléments en traces (par exemple,  $Mn^{2+}$ ,  $REE^{2+/3+}$ ,  $Cr^{2+}$ , Götze, 2012).

Différentes études sur le quartz ont pu relever plus de 20 types de défauts entraînant une gamme de bandes d'émission de luminescence dans la région UV, visible et infrarouge (e.g., Kostov & Bershov, 1987 ; Weil, 1984, 1993). Les bandes d'émission de CL les plus courantes dans le quartz naturel sont les bandes de 450 et 650 nm donnant respectivement des couleurs entre le violet et le

jaune. En fonction des conditions de formation du quartz, le minéral prendra des couleurs différentes. La CL des carbonates est liée à la présence et / ou à l'absence d'ions activateurs ( $Mn^{2+}$ ,  $REE^{2+/3+}$ ), d'ions sensibilisants ( $Pb^{2+}$ ) et d'ions désactiveurs ( $Fe^{2+/3+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ). Le  $Mn^{2+}$  est l'ion activateur le plus important dans les carbonates (e.g. Marfunin, 1979 ; Marshall, 1988 ; Mason & Mariano, 1990 ; Machel & Burton, 1991 ; El Ali et al., 1993 ; Habermann et al., 1997). La bande d'émission de la luminescence dans les carbonates se situe autour de 400 nm (couleur rouge à jaune), ce qui a été relié à un défaut d'électron dans le groupe  $CO_3$  (Habermann et al., 1997). Par exemple, la dolomite sera moins luminescente (couleur rouge/orangé) qu'une calcite (couleur orange à jaune), car elle contiendra moins de manganèse que la calcite.

L'étude du quartz en cathodoluminescence MEB a été réalisée à l'Université de Genève, au Département des Sciences de la Terre et de l'Environnement sur un microscope électronique à balayage JEOL JSM7001F. Le MEB est équipé d'un analyseur de rayons X à dispersion d'énergie EDS JED2300 et d'un détecteur de cathodoluminescence. Uniquement le quartz a été étudié à la CL-MEB, la calcite étant trop luminescente. L'étude de la calcite, de la dolomite et du quartz, en cathodoluminescence froide a été effectuée i) à l'Université de Genève, utilisant une cathode froide CITL 8200 Mk 5-1 montée sur un microscope Leitz Orthoplan et ii) à l'Université de Montpellier, utilisant une CITL 8200 Mk 5-1 montée sur microscope Olympus BX41.

### 3. Microthermométrie des inclusions fluides

L'étude microthermométrique des inclusions fluides a été faite sur un microscope optique Axioplan 2 Zeiss équipé d'une cellule Linkam fermée comprenant une platine chauffante et relié à une caméra Qimaging. Le logiciel LINKSYS 32 permet de contrôler la température et de réaliser des cycles successifs de chauffage et de refroidissement des inclusions fluides. La gamme de température possible dans la platine est de  $-200\text{ °C}$  jusqu'à environ  $600\text{ °C}$ . La microthermométrie permet de mesurer la température des transitions de phases constituant les inclusions fluides. Les températures mesurées sont présentées dans l'annexe III.1. Quatre changements de phases ont été mesurés dans les inclusions fluides pendant les passages depuis les basses températures vers les hautes températures :

- La température eutectique ( $T_e$ ) correspond à la température minimale de stabilité du liquide ou la température du début de fusion de la glace. L'inclusion montrera un changement de couleur et une texture granulaire.
- La température de fusion finale de la glace ( $T_{mice}$ ) correspond à la température de fusion du dernier cristal de glace, température à laquelle une inclusion fluide se transforme d'un état homogène à un état hétérogène (lorsqu'un mouvement de la bulle de vapeur apparaît lors de la fusion du dernier cristal de glace).

- La température d'homogénéisation ( $T_h$ ) correspond à la température à laquelle une inclusion se transforme d'un état hétérogène (à température ambiante) à un état homogène.
- La température de fusion du cube de halite ( $T_{mh}$ ) correspond à la température à laquelle le cube de halite fond complètement lors du chauffage progressif de l'inclusion fluide.

Dans le cadre de cette étude, lorsqu'il sera évoqué la « température », celle-ci correspondra aux températures minimales de fusion du cube de halite des LVS et des températures minimales d'homogénéisation (Liquide-vapeur) des inclusions LVS lorsque ce n'était pas possible d'obtenir des  $T_{mh}$ . Le thermocouple a été étalonné à l'aide de standards des inclusions fluides synthétiques d'eau pure et d'un gaz pur en  $CO_2$ . Les températures obtenues sont légèrement différentes des températures théoriques (Température de fusion de la glace -  $T_{mice} = 0,4 \pm 0,2^\circ C$  au lieu de  $0^\circ C$ , Température critique -  $T_{h(L \rightarrow V)} = 372 \pm 1^\circ C$  au lieu de  $374^\circ C$  et la température de fusion -  $T_{mCO_2} = -55,7 \pm 0,5^\circ C$  au lieu de  $-55,6^\circ C$ ), un facteur de correction a été appliqué automatiquement par le logiciel. Les erreurs sont de l'ordre de  $5^\circ C$  pour les températures eutectiques, de  $0,1^\circ C$  pour les températures de fusion de la glace, de  $1^\circ C$  pour les températures d'homogénéisation et de  $1^\circ C$  pour les températures de fusion du cube de la halite. La salinité des inclusions fluides de type LVS est exprimée en fonction de la composition en % poids équivalente NaCl et  $CaCl_2$ . Aucune donnée de salinité n'a pu être obtenue pour les inclusions fluides de type LV. La salinité dans le système  $H_2O$ -NaCl- $CaCl_2$  a été défini par la première température de fusion de la glace  $T_e = -70,0^\circ C$  impliquant ce système ternaire NaCl- $H_2O$ - $CaCl_2$  calculée à partir des températures de fusion du cube de glace ( $T_{mice}$ ) et des températures de fusion du cube de halite ( $T_{mh}$ ) à l'aide du programme de calcul Excel proposé par Steele-MacInnis et al. (2010). Les équations empiriques développées dans l'étude de Steele-MacInnis et al. (2010) décrivent la géométrie de la surface du liquidus et les courbes cotectiques pour le diagramme de phase  $H_2O$ -NaCl- $CaCl_2$ .

#### 4. Spectrométrie Raman

Les mesures en spectrométrie Raman ont été effectuées par un spectromètre Renishaw Invia équipé d'un détecteur CCD au silicium refroidi par effet Peltier utilisant une longueur d'onde d'excitation laser de 532 nm (réseau de  $2400\text{ g.mm}^2$ ), résolution spectrale d'environ  $1\text{ cm}^{-1}$  (Institut de Charles Coulomb à l'Université de Montpellier). La lumière diffusée a été collectée via un objectif 100x Leica N Plan en configuration de rétrodiffusion (taille latérale du point laser d'environ  $0,8\text{ }\mu\text{m}$ ). Deux acquisitions ont été accumulées pour fournir un spectre. Un exemple de mesure en spectrométrie Raman traitée à l'aide du logiciel Wire est proposé dans la Figure III.1. Uniquement quelques phases vapeurs des inclusions fluides de types LVS et VL issues des minéralisations massives ont pu être analysées.

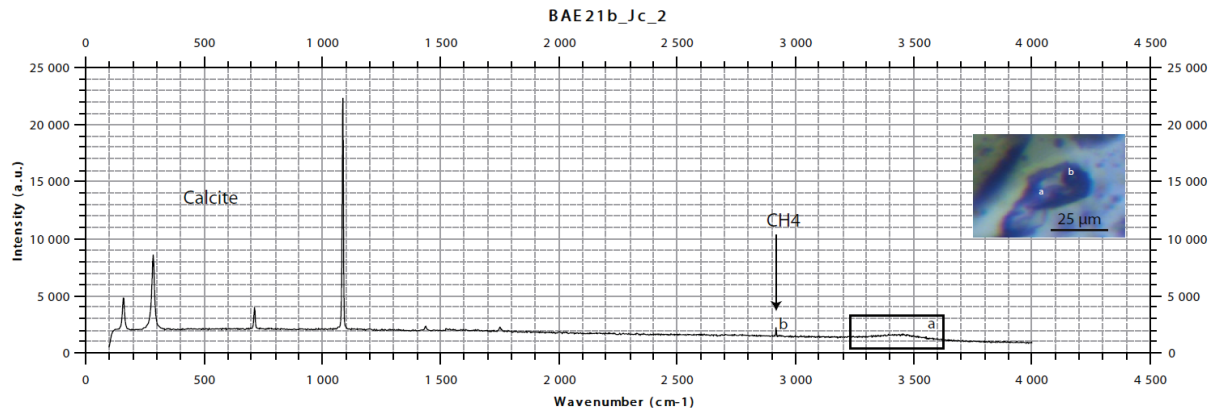


Figure III.1 : Spectre Raman indiquant la nature du liquide (H<sub>2</sub>O) et de la bulle de vapeur (CH<sub>4</sub>)

### 5. Analyse LA-ICP-MS par ablation laser

Les analyses des inclusions fluides au LA-ICP-MS ont été effectuées à l'ETH de Zurich en utilisant un laser excimer ArF (193 nm) (Figure III.2A et B). Les inclusions fluides ont été analysées avec des spots entre 30 et 10 microns de diamètre à une fréquence de 10 Hz. Les données ont été récoltées dans un spectromètre de masse ICP quadripolaire Elan6100 DRC. Une densité d'énergie du laser de  $12 \text{ J. cm}^{-2}$  a été utilisée équivalent à 22 kV de tension. Le bruit de fond a été enregistré durant 30 secondes avant le début des analyses allant jusqu'à 40 secondes d'ablation. Le signal d'une inclusion fluide triphasée (Liquide-Vapeur-Cube de halite) est visible sur la figure III.2C. Les isotopes suivants, qui ont été analysés au laser LA-ICP-MS, seront appelés éléments majeurs pour les inclusions fluides :  $^{23}\text{Na}$ ,  $^{35}\text{Cl}$ ,  $^{39}\text{K}$ ,  $^{43}\text{Ca}$  ; éléments en traces :  $^7\text{Li}$ ,  $^{11}\text{B}$ ,  $^{25}\text{Mg}$ ,  $^{29}\text{Si}$ ,  $^{55}\text{Mn}$ ,  $^{79}\text{Br}$ ,  $^{85}\text{Rb}$ ,  $^{88}\text{Sr}$ ,  $^{95}\text{Mo}$ ,  $^{133}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Ba}$ ,  $^{205}\text{Tl}$  ; et métaux :  $^{34}\text{S}$ ,  $^{57}\text{Fe}$ ,  $^{59}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Ni}$ ,  $^{63}\text{Cu}$ ,  $^{66}\text{Zn}$ ,  $^{75}\text{As}$ ,  $^{107}\text{Ag}$  et  $^{208}\text{Pb}$ . Pour l'étalonnage, le verre synthétique multiéléments NIST 610 est utilisé avec une taille de faisceau de 40 microns et une fréquence de 10 Hz (Pearce et al., 1997).

Le standard Scapolite 17 a également été analysé lors de chaque session analytique en tant que matériel de contrôle qualité afin de contrôler la précision et l'exactitude des mesures, ainsi que la stratégie d'étalonnage, mais aussi de standard primaire pour le traitement des halogènes (Cl et Br) (Kendrick, 2012). Les concentrations utilisées proviendront de ce traitement spécifique. Les signaux ont été traités à l'aide du logiciel SILLS (Guillong et al., 2008). La salinité correspond aux concentrations en % poids équivalent de NaCl et CaCl<sub>2</sub>. La concentration en % poids équivalent de NaCl a été déterminée grâce à la microthermométrie, afin d'être utilisée comme étalon interne. Cependant, les valeurs en Ca, Mn, Mg et Si ne sont pas utilisables à cause du signal trop important du minéral hôte (calcite et quartz).

Les IFs ont été considérées individuellement et non pas regroupées ou moyennées par assemblages d'inclusions fluides (association d'inclusions de même nature associé au même intervalle de temps de formation).

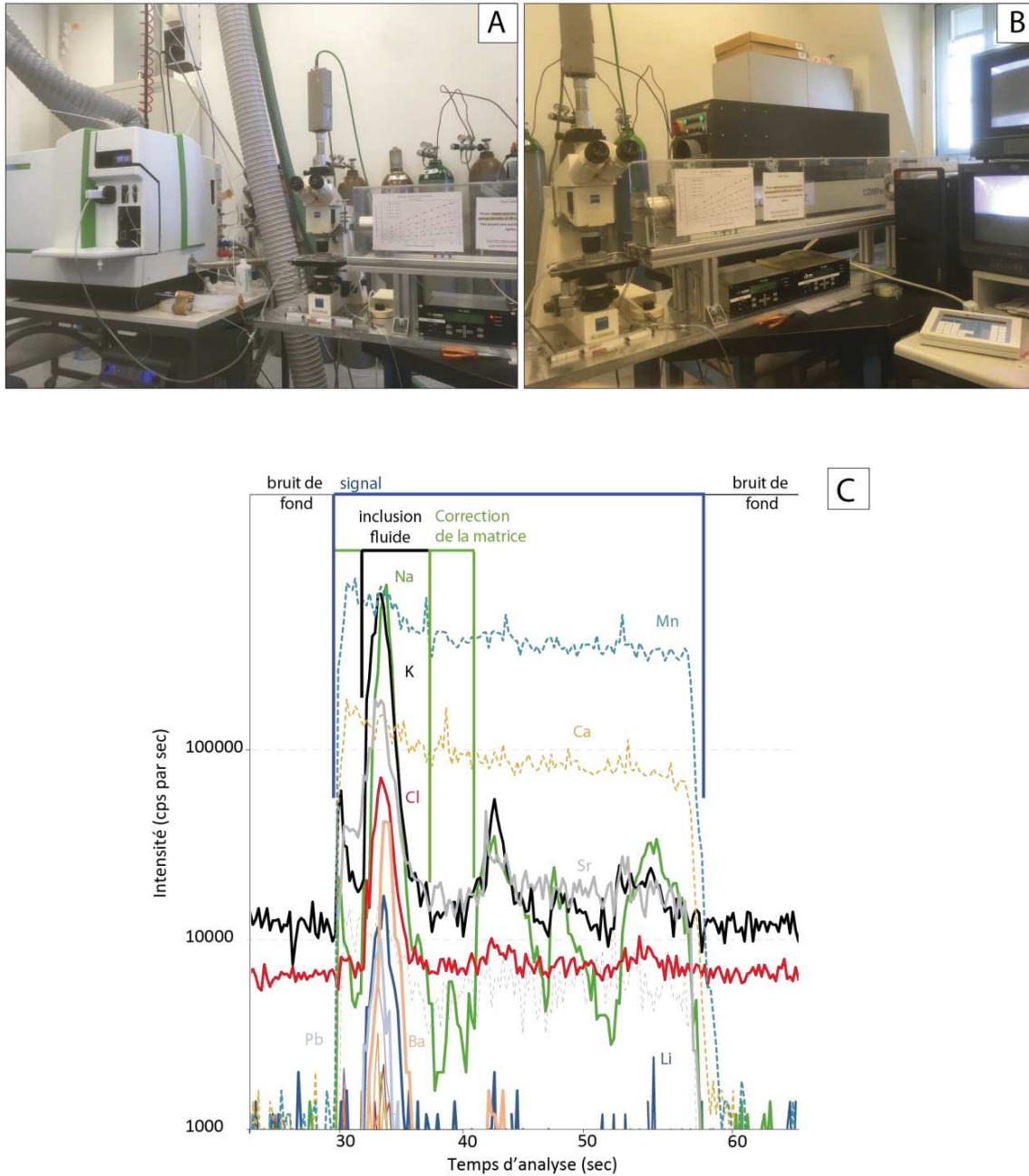


Figure III.2 : Laser LA-ICP-MS de l'ETH de Zurich. A) LA-ICP-MS. B) système Laser. C) Signal au laser LA-ICP-MS d'une inclusion fluide triphasée liquide-vapeur-cube de halite en fonction du temps d'analyse, le signal du minéral hôte (calcite) est également analysé

## C. Pétrographie des inclusions fluides

### 1. Les minéraux hôtes : le quartz et la calcite

L'étude des inclusions fluides s'est concentrée sur les gangues minérales encaissant les minéralisations de cobalt et de nickel et tout particulièrement dans le quartz et la calcite. Sept lames minces ont été étudiées parmi les trois structures minéralisées exploitées dans le district cobaltifère de Bou Azzer (Tableau III.1). Leur étude a été faite au regard de la succession paragenétique obtenue et présentée par la Figure III.3. Les minéraux hôtes concernés par l'étude des inclusions fluides en microthermométrie et LA-ICP-MS sont soulignés par une étoile rouge dans le tableau paragenétique (Figure III.3). De la même manière, la Figure III.4 montre ces paragenèses à l'échelle de l'affleurement et la figure III.5 à l'échelle de la lame épaisse. L'étude des IFs incluses dans les minéraux hôtes des minéralisations massives s'est concentrée sur la gangue carbonatée décrite dans le chapitre II, composée de calcite rhomboédrique et bréchique (Calc 2) (Figure III.4A) et la gangue siliceuse composée uniquement de chlorite, de quartz à texture mosaïque (Qtz 1) et de chalcopirite (Figure III.4B). L'étude des IFs dans les poches et dans les veines s'est focalisée sur les deux gangues minérales encaissant les minéralisations : le quartz en peigne (Qtz 2) et la calcite (Calc 4) (Figures III.3, III.4C et D).

Minéraux	Les minéralisations massives	Les veines et les poches	Stade supergène
<b>Minéralisation</b>			
Serpentine	██████████		
Talc	██████████		— ? —
Nickeline	Nk1 ██████████ Nk2 ██████████		
Rammelsbergite	Ram ██████████		
Cobaltite	Cob1 ██████████ Cob2 ██████████ Cob3 ██████████		
Skuttérodite	Skut1 ██████████ Skut2 ██████████ Skut3 ██████████		
Loellingite	Loel1 ██████████ Loel2 ██████████		
Safflorite	Saf11 ██████████ Saf12 ██████████		
Gersdorphite	Gd ██████████		
Sphalérite	S11 ██████████ S12 ██████████		
Galène	G1 ██████████		
Arsénopyrite	Asp1 ██████████ Asp2 ██████████		
Chalcopirite	Cp1 ██████████ Cp2 ██████████		
TN-TD			
Bornite		Bo ██████████	
Erythrine			Ert
Titanite			Tit
<b>Minéraux de gangue</b>			
Calcite	Calc1 ██████████ Calc 2.1 ██████████ Calc 2.2 ██████████	Calc 3 ██████████ Calc 4.1 ██████████ Calc 4.2 ██████████ Calc 5 ██████████	Calc 6
Dolomite		Dol 1 ██████████	
Quartz	Qtz 1.1 ██████████ Qtz 1.2 ██████████ Qtz 1.3 ██████████	Qtz 2 ██████████ Qtz 3 ██████████	
Chlorite	Ch11 ██████████	Ch12 ██████████	
Aduilaire			Adu

Figure III.3 : Tableau paragenétique des minéralisations de Bou Azzer dans lequel les minéraux pour l'étude des inclusions fluides sont indiqués d'une croix rouge. Les différentes associations d'IF sont également indiquées. (LVS : liquide-vapeur-cube de halite, VL: liquide-vapeur dominante, IF : inclusion fluide)



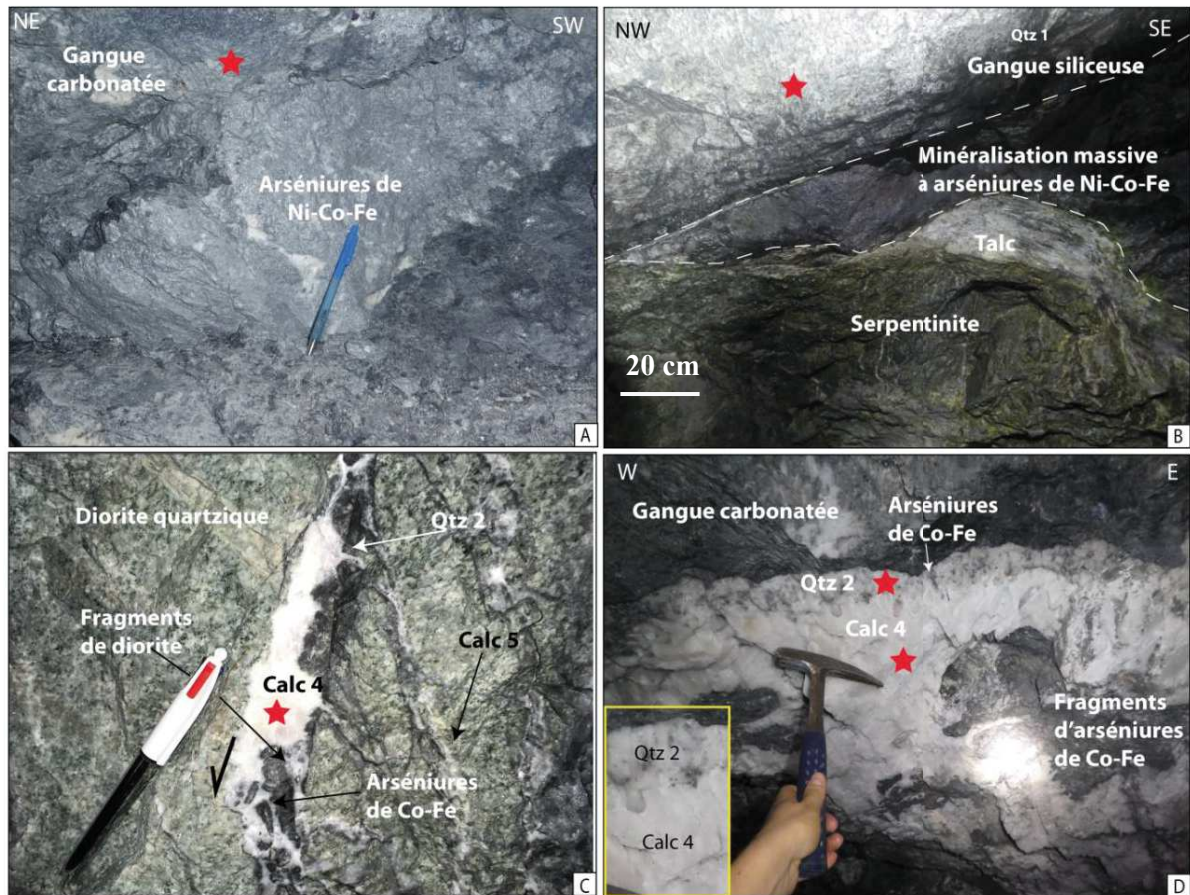


Figure III.4: Localisation des différents minéraux de gangues à l'échelle de l'affleurement : A) Gangue carbonatée (Calc 2) encaissant les minéralisations massives à arsénures de Ni, Co et Fe. B) Gangue siliceuse englobant les minéralisations massives d'arsénures de Co et Fe. C) Veines composées de quartz (Qtz 2) associé à des arsénures de Co et Fe, et de calcite (Calc 4) recoupant la diorite quartzique, des veines tardives stériles (Calc 5 et Qtz 3) sont également observées. D) Grandes poches géodiques composées de quartz en peigne (Qtz 2) associés aux arsénures de fer et de cobalt, de calcite (Calc 4) et de fragments d'arsénures de fer, et d) les veines encaissant les arsénures de cobalt et de fer dans une gangue de quartz en peigne (Qtz 2) et de carbonates (Calc 4). (Calc : calcite, Qtz : quartz, Co : cobalt, Fe : fer, Ni : nickel)

Les minéraux de gangue étudiés pour l'étude des inclusions fluides sont également figurés d'une étoile rouge dans la Figure III.5A. L'utilisation de la cathodoluminescence a permis de déterminer la caractérisation de la pétro/chronologie et les zones préférentielles à l'étude des inclusions fluides. Les minéraux hôtes sont les suivants :

- Les deux textures de la gangue carbonatée associées à la fin du stade à cobalt (Calc 2.1) et au stade à sulfures (Calc 2.2), mises en évidence par la cathodoluminescence froide (Figure III.4A, Figure III.5B et C).
- La gangue siliceuse encaissant le stade à Co et Fe des minéralisations massives et composée de trois générations de quartz (Figure III.4B) : i) un quartz brun 1.1 représentant la gangue siliceuse, sans texture préférentielle, et d'aspect brun, ii) un quartz 1.2 transparent associé à de la chlorite et d'aspect bréchiq, iii) un quartz 1.3 dans une veine fracturant la gangue

siliceuse. Ces trois quartz ont fait l'objet d'étude des inclusions fluides de Bou Azzer afin de comprendre le lien entre la gangue siliceuse et carbonatée.

- Les veines qui présentent une paragenèse plus complexe débutant avec des cristallisations de dolomite (Dol 1) et de la calcite (Calc 3) (Figure III.5D). La distinction entre la dolomite et la calcite est visible en cathodoluminescence (Figure III.6D) et au QEMSCAN (chap 2. Figure II.37D). La minéralisation se poursuit ensuite avec du quartz en peigne pluricentimétriques (Qtz 2) et de calcite comblant les espaces entre les cristaux de quartz. Les veines les plus tardives sont à adulaire, quartz en mosaïque (Figure III.5E) et calcite (Calc 5) de couleur orange clair en cathodoluminescence (Figure III.4D). L'étude des inclusions fluides s'est uniquement faite sur le quartz (Qtz 2) et la calcite (Calc 4.2) des veines.
- Les poches contiennent également les deux minéraux de gangues, à savoir le quartz (Qtz 2) en peigne et pluridécimétriques associé à la skutterudite 3 (Figures III.5C et III.6F) et la calcite à la fois bréchique (Calc 4.1) et automorphe (Calc 4.2) (Figure III.5G).

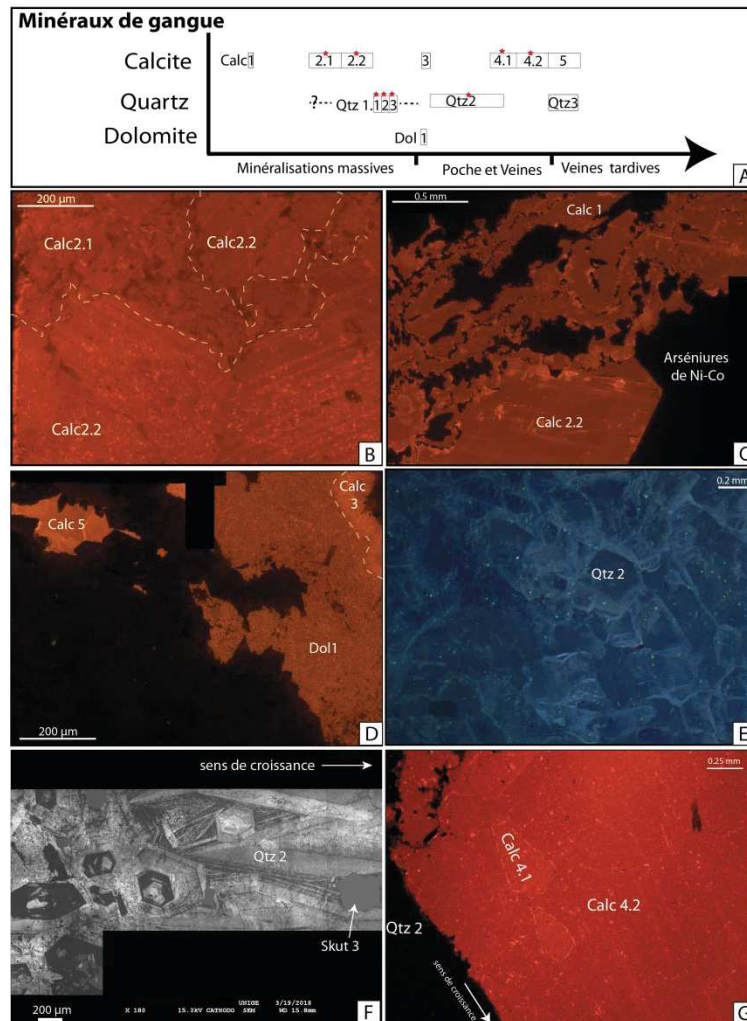


Figure III.5 : A) Succession paragenétique détaillée des minéraux de gangues et de veines des minéralisations de Bou Azzer. Illustrations des différentes générations et texture des calcites et des quartz, Les images sont prises en cathodoluminescence froide (B, C, D, G) et chaude (F, E). (Calc : calcite, Qtz : quartz, Dol : dolomite, Ni : nickel, Co : cobalt, Skut : skutterudite)

## 2. Description des inclusions fluides

Les inclusions fluides étudiées sont toutes considérées comme primaires ou pseudo-secondaires, car comprises dans des bandes de croissances et/ou le long de ces bandes pour les primaires, soit piégées dans des fractures du minéral avant la fin de sa croissance pour les pseudo-secondaires (Figure III.6A et C). Certaines inclusions fluides dites secondaires se distribuent le long de fractures recoupant les minéraux et se sont fait piéger après que la croissance du minéral hôte soit terminée (Figure III.6B et D). Leur petite taille n'a pas permis de réaliser l'analyse microthermométrique de ces dernières.

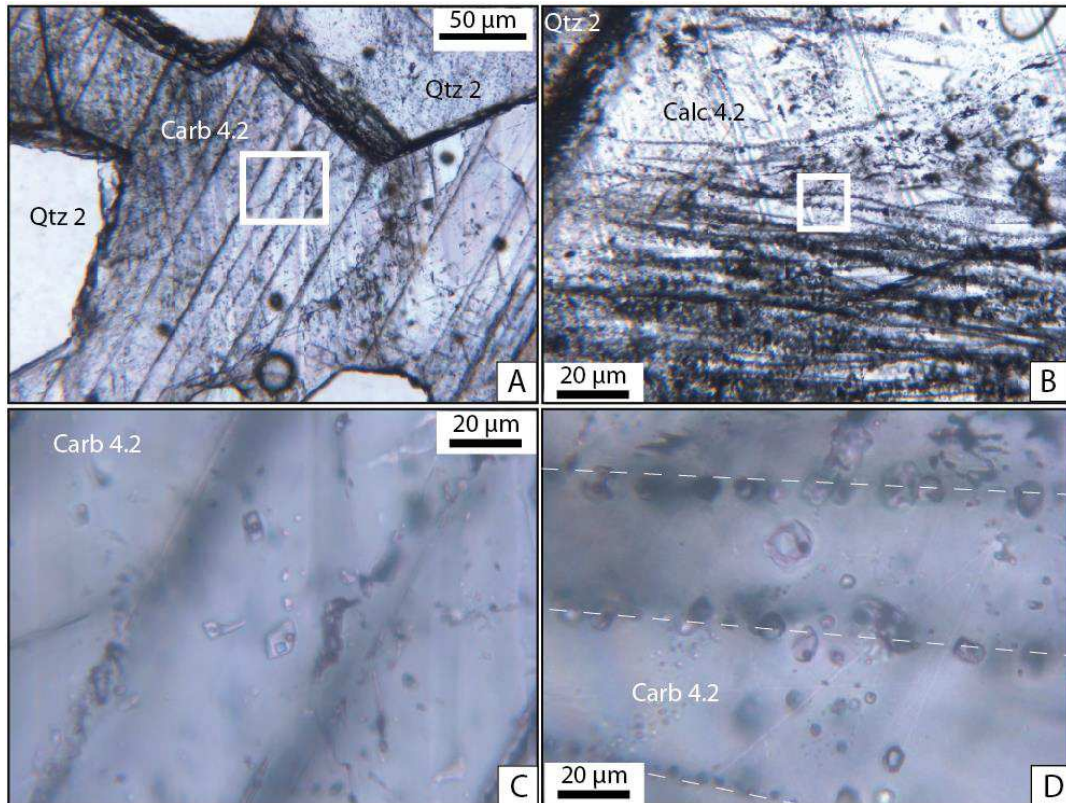


Figure III.6 : A) Inclusions fluides (IF) primaires et pseudo-secondaire dans la gangue carbonatée des poches à l'échelle de la lame épaisse. B) IF secondaires dans la gangue de calcite des poches à l'échelle de la lame épaisse. C et D) Distribution des IF dans les calcites 4.2 des poches

Différents types d'inclusions fluides ont été observés et sont présents dans les minéralisations de Bou Azzer : i) des inclusions fluides triphasées Liquide-Vapeur-Solide (LVS). Ce solide est généralement un cube de halite (Figure III.7A), ii) des inclusions fluides biphasées composées de Liquide et d'une bulle de Vapeur dominante (VL) (Figure III.7B), iii) des inclusions monophasées à phase Vapeur (V) visibles dans la figure III.7C et iv) des inclusions solides (S) de cube de Halite ou d'apatite (Figure III.7D). L'association entre des inclusions Vapeur (V) et des inclusions solides composées de cube de halite (S) a été remarquée dans certaines minéralisations (Figure III.7E). Des inclusions décrépitées ont également été observées (Figure III.7F). La distribution des IFs parmi les différentes gangues minérales dans les minéralisations massives, les poches et les veines est représentée sur le modèle pétro-structural des minéralisations (Figure III.8).

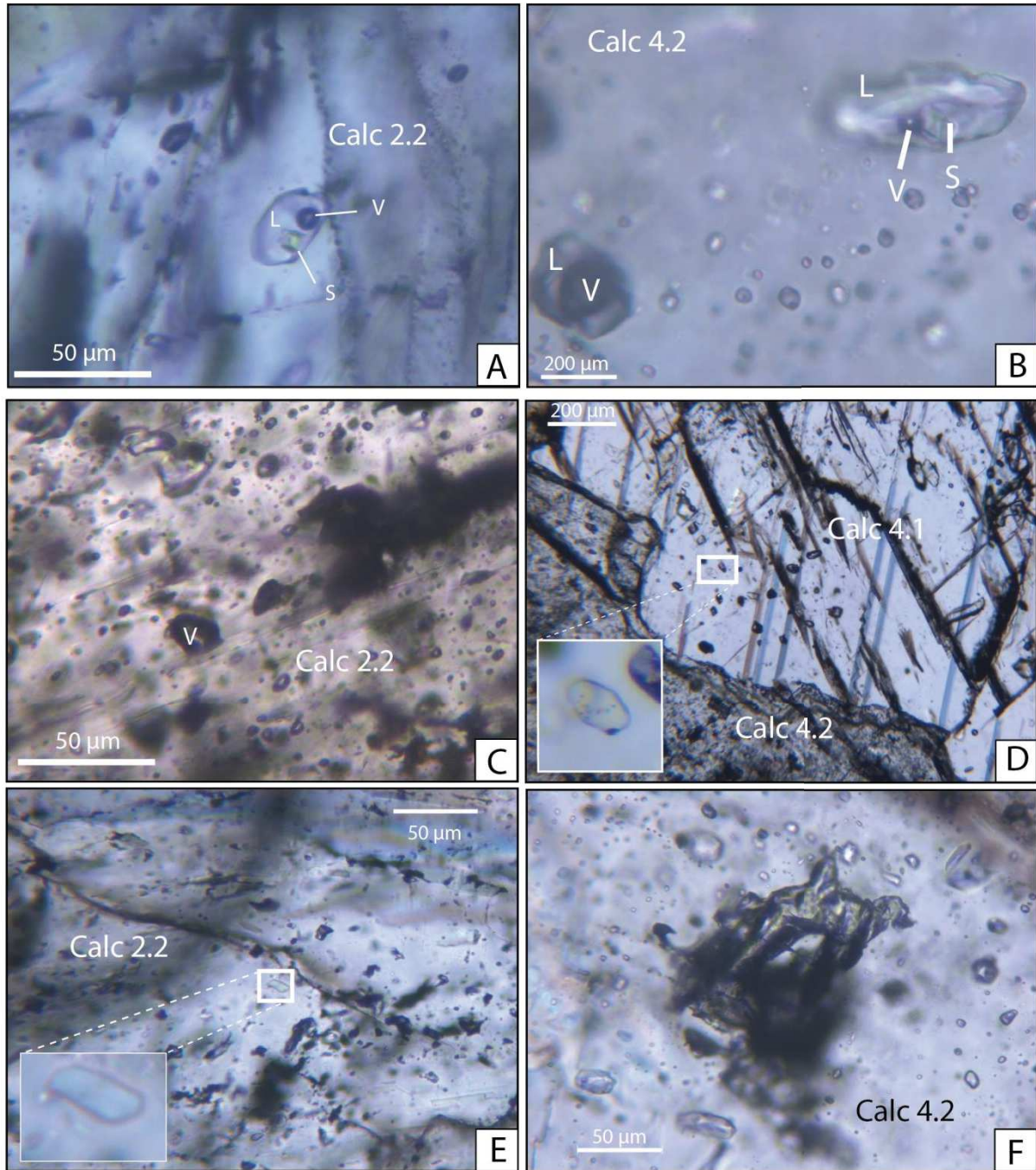


Figure III.7 : A) Inclusion triphasée liquide (L) - vapeur (V) - cube de halite (S). B) Inclusion biphasée liquide-vapeur et triphasée (LVS). C) Inclusion monophasée Vapeur. D) Inclusion solide de halite associée à des inclusions vapeur noires. E) Inclusion solide d'apatite, F) Inclusion décrépitée

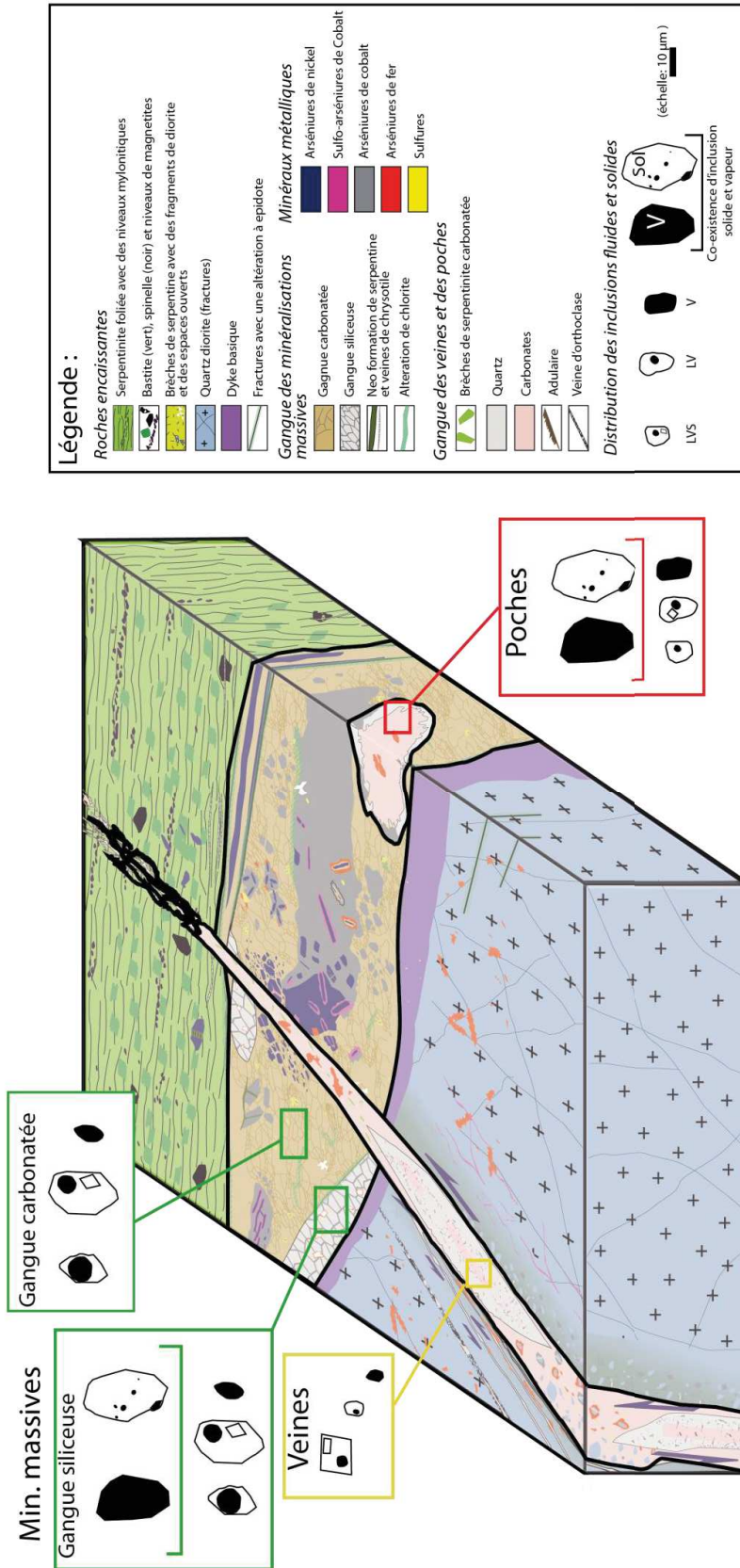


Figure III.8 : Dessin schématique des minéralisations de Bou Azzer montrant les différentes inclusions fluides, étudiées et observées dans les minéraux de gangue (LVS : liquide-vapeur-cube de halite, VL : liquide-Vapeur dominante, S : solide, V : vapeur, m : mètres, min. massives : minéralisations massives)

**a) Les inclusions fluides au sein des minéralisations massives**

Dans les gangues carbonatées des minéralisations massives, plusieurs types d'inclusions fluides ont été rencontrés :

- i) La calcite (Calc 2.1) contient des inclusions fluides de type LVS et VL. Ces inclusions fluides sont le plus souvent primaires sauf lorsqu'elles suivent les clivages de la calcite et sont alors pseudo-secondaires. La taille des inclusions fluides varie entre 10 et 13  $\mu\text{m}$  et leur forme est soit allongée ou arrondie (Figure III.9A1-B1).
- ii) La calcite (Calc 2.2) associée au stade à arséniures de fer et au stade à sulfures contient des inclusions fluides de LVS, VL et V. Les inclusions ont des tailles variant entre 8 et 32  $\mu\text{m}$  (Figure III.9C1-D1). Leur forme est majoritairement allongée suivant les plans de clivages de la calcite, anguleuse et/ou arrondie. L'association entre ces trois types d'inclusions met en avant le phénomène d'ébullition dont les conséquences en termes d'interprétation seront discutées plus loin.

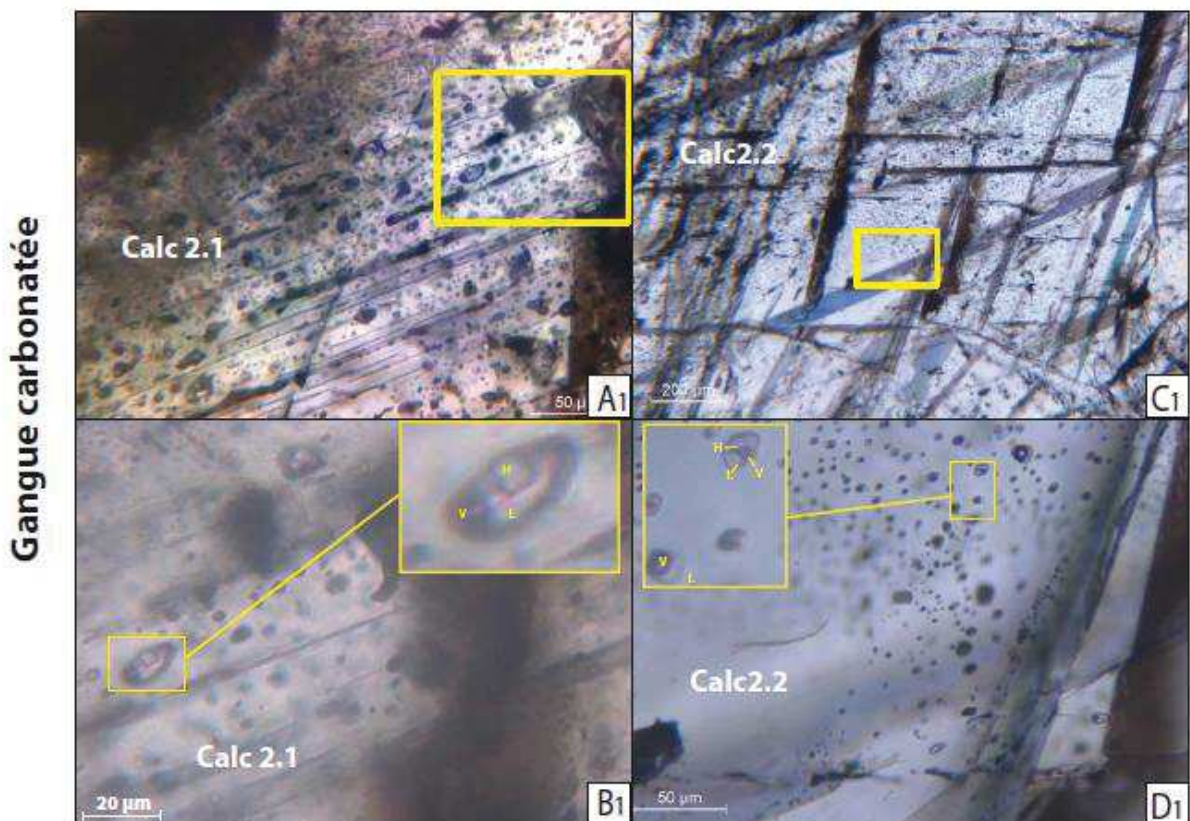


Figure III.9 : A1-C1-A2-C2-E2) Photographie au microscope optique et en lumière naturelle représentant une vue globale de la distribution des inclusions fluides au sein des différentes générations de minéralisations à l'échelle du minéral. B1- D1-B2-D2-F2) Vues rapprochées des inclusions fluides représentatives (calc : calcite, qtz : quartz)

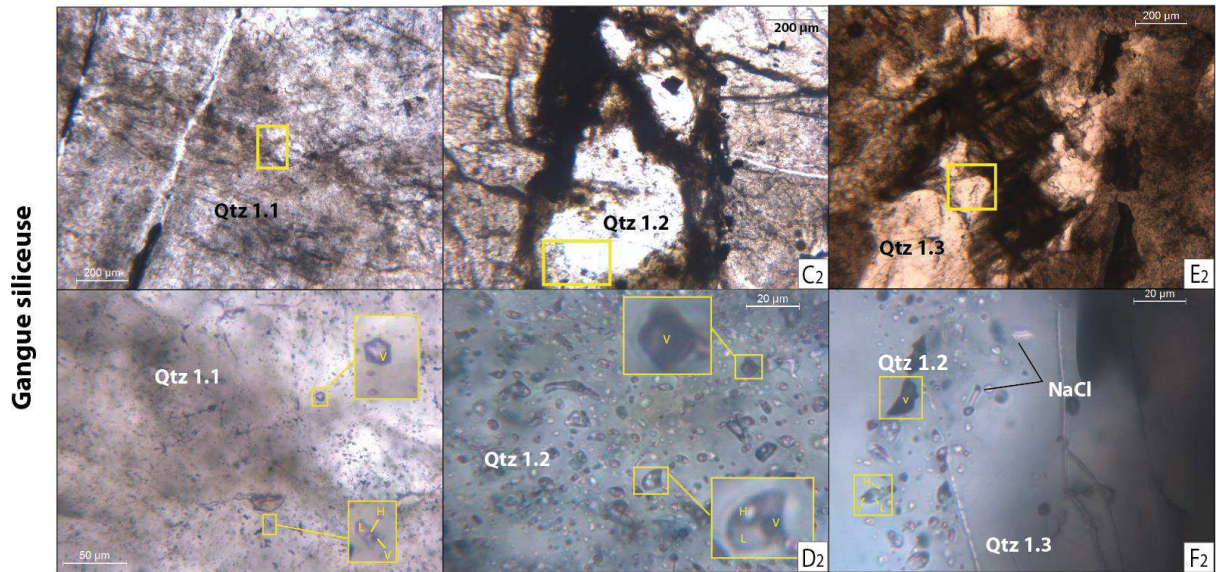


Figure III.9 : A1-C1-A2-C2-E2) Photographie au microscope optique et en lumière naturelle représentant une vue globale de la distribution des inclusions fluides au sein des différentes générations de minéralisations à l'échelle du minéral. B1- D1-B2-D2-F2) Vues rapprochées des inclusions fluides représentatives (calc : calcite, qtz : quartz)

Dans les gangues siliceuses, plus rares, tous les types d'inclusions se rencontrent, à savoir, LVS, VL, V et les inclusions solides-vapeur. Toutefois, trois différents types de quartz ont été définis :

- i) Le quartz 1.1, représentant la gangue siliceuse, est sans texture visible. Les inclusions fluides observées dans cette gangue sont les LVS, VL, V et S. Les inclusions solides de cube de halite n'ont pas été observées au microscope, seulement au laser LA-ICP-MS. Les tailles des inclusions fluides triphasées et biphasées varient entre 8 et 25 µm, leur forme n'est pas homogène et certaines inclusions sont allongées et arrondies ou anguleuse (Figure III.9A2-B2).
- ii) Le quartz 1.2 a été défini comme une phase postérieure au quartz général et s'identifie comme un fragment de quartz de couleur transparente associé à la chlorite. Dans ce dernier, il est observé des inclusions LVS, VL, V et les inclusions solide-vapeur associées (Figure III.9C2-D2). Leurs tailles varient entre 8 et 29 µm et leurs formes entre allongées, rondes, anguleuses à sans forme.
- iii) Le quartz 1.3 est situé dans des veines recoupant la gangue siliceuse. Ce quartz est transparent et associé à la chlorite (Figure III.9E2). Les inclusions fluides qui composent ce quartz sont des LVS, V et des inclusions (S) qui ne sont pas associées à des inclusions vapeurs. Les LVS sont de petites tailles (environ 10 µm) et de forme très allongée, il en va de même pour les inclusions solides (Figure III.9E2-F2).

**b) Les inclusions fluides dans les veines**

Les gangues de quartz et de carbonates des veines décrivent trois types d'inclusions de LVS, VL et des inclusions minérales :

- iv) Le quartz 2, à texture mosaïque (Figure III.5E) et en peigne dans les veines (Figure III.5F), contient des inclusions LVS, VL (Figure III.10A-B) et des inclusions minérales de calcite. Les inclusions fluides sont de forme allongée et cubique, la taille de ces inclusions variant entre 10 et 22  $\mu\text{m}$ , avec quelques inclusions faisant 40  $\mu\text{m}$ .
- v) Deux types d'IF ont été déterminés dans la calcite (Calc 4.2) associée au stade à fer et à sulfures des veines : des IFs de LVS (Figure III.10C-D) et VL. La forme de ces inclusions est cubique, sous forme de cristaux négatif et très anguleuse. Leurs tailles sont en moyenne de 30  $\mu\text{m}$ .
- vi) Le quartz 3 présente des inclusions LVS et VL (Figure III.10E-F). La taille des inclusions varie entre 9 et 12  $\mu\text{m}$  et leurs formes entre des formes allongées.

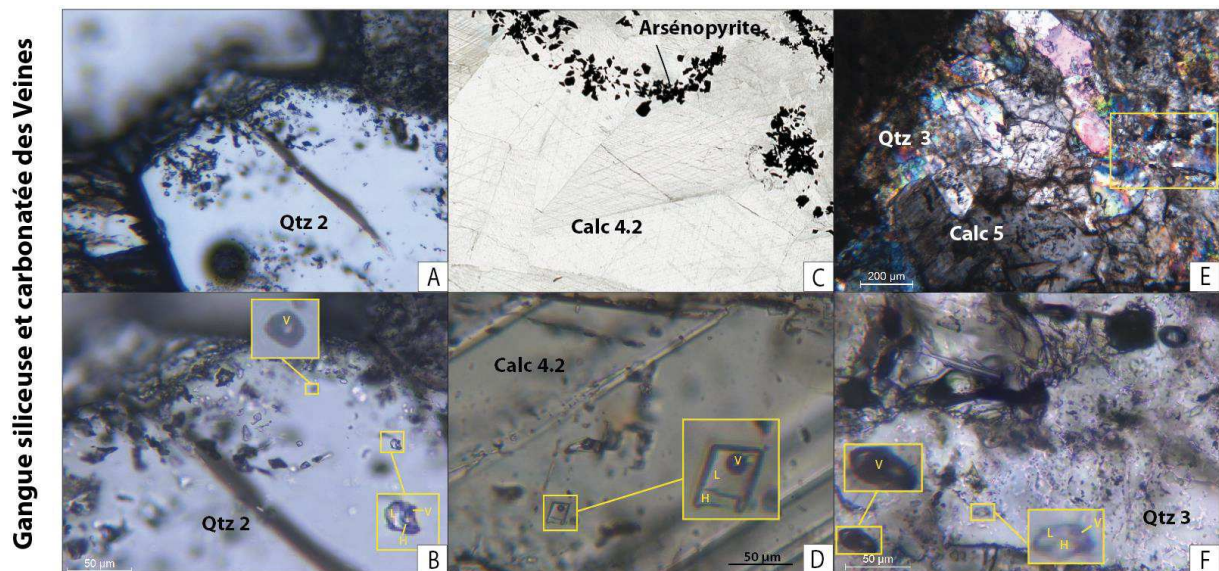


Figure III.10: A-C-E) photographies au microscope optique et en lumière naturelle et polarisée (E) représentant la distribution des inclusions fluides au sein des différentes générations de minéralisations de type veine. B-D-F) vue rapprochée des inclusions (Calc : calcite, Qtz : quartz)



**c) Les inclusions fluides dans les poches**

Ces poches géodiques contiennent trois types d'inclusions fluides : LVS, VL et V, ainsi que l'association entre des inclusions V et S :

- i) Les quartz (Qtz 2) en peigne (Figure III.11A) montrent uniquement des inclusions LVS de tailles variant entre 7 et 27  $\mu\text{m}$  avec des formes anguleuses et parfois allongées (Figure III.11B).
- ii) Les carbonates composant la majorité de la poche ont été divisés en deux générations de calcite : Calc 4.1 et Calc 4.2 (Figure III.5G) qui montrent les caractéristiques suivantes :
  - a. La calcite bréchifiée montre l'association entre des inclusions solides (S) (zoom de la Figure III.11D) et des inclusions monophasées de vapeur (V) très sombres (Figure III.11D). La taille des inclusions solides et vapeurs varie entre 5 et 48  $\mu\text{m}$ . La forme des inclusions V est allongée et arrondie. Les inclusions solides (S) montrent des formes plus anguleuses plus proches des formes minérales.
  - b. Les inclusions observées dans la calcite automorphe sont des LVS, VL et V (Figure III.11E-F). Leurs formes sont allongées et anguleuses, leurs tailles varient entre 7 et 24  $\mu\text{m}$  avec quelques inclusions à 35  $\mu\text{m}$  environ.

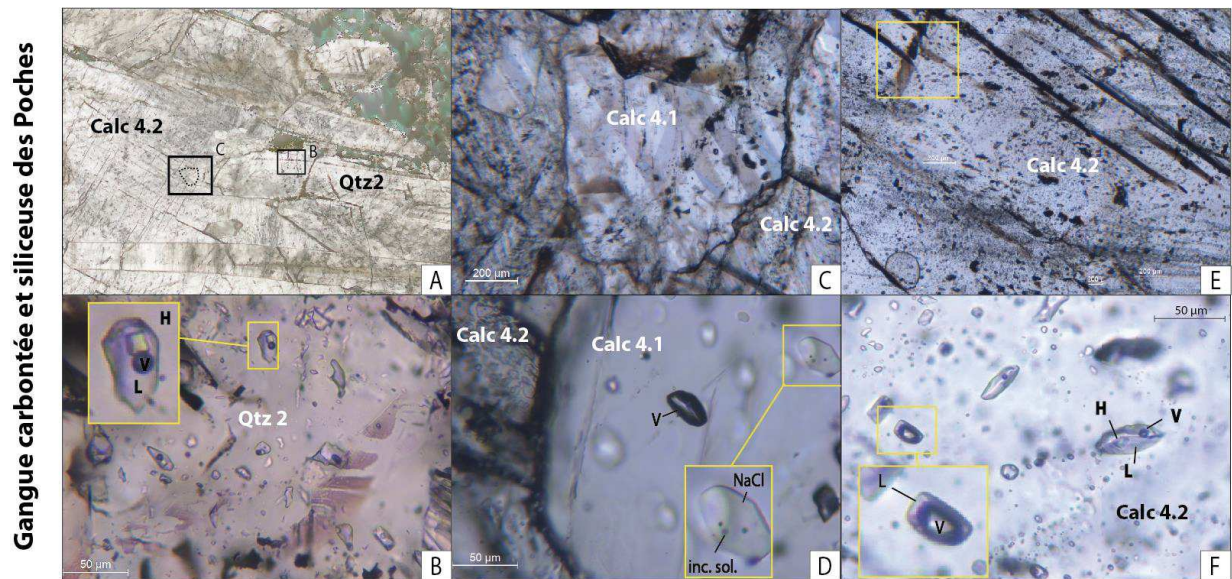


Figure III.11 : A-C-E) photographie au microscope optique et en lumière naturelle représentant la distribution des inclusions fluides au sein des différentes générations de minéralisations. B-D-F) vues rapprochées des inclusions (Calc : calcite, Qtz : quartz, inc. Sol. : inclusion solide)

### 3. Mesures microthermométriques des inclusions fluides

#### a) Données de la cryométrie et du chauffage

Les données de température mesurées et de la pétrologie des IFs triphasées sont présentées dans l'annexe III.1 : les données des températures eutectiques ( $T_e$ ), les températures de fusion du dernier grain de glace ( $T_{mice}$ ), les températures d'homogénéisation ( $T_h$ ) et les températures de fusion de cube de halite ( $T_{mh}$ ) indiquent les valeurs minimales, maximales, les moyennes et écart-type associées aux différents inclusions fluides.

- Les inclusions fluides de type LVS dans la gangue siliceuse (Qtz 1) des minéralisations massives montrent des  $T_e$  entre  $-87.7$  et  $-64.5^\circ\text{C}$ , des  $T_{mice}$  entre  $-48.5$  et  $-24^\circ\text{C}$ , des  $T_{h(L\rightarrow V)}$  entre  $154$  et  $260^\circ\text{C}$ , et des  $T_{mh}$  entre  $245.4$  et  $369^\circ\text{C}$ . Les inclusions fluides de type LVS dans la gangue carbonatée (Calc2) montrent des  $T_e$  entre  $-95.9$  et  $-64^\circ\text{C}$ , des  $T_{mice}$  entre  $-62.7$  et  $-24^\circ\text{C}$ , des  $T_{h(L\rightarrow V)}$  entre  $177.7$  et  $277.7^\circ\text{C}$ , et des  $T_{mh}$  entre  $220$  et  $340^\circ\text{C}$
- Les inclusions fluides de type LVS au sein de la gangue siliceuse (Qtz 2) des poches indiquent des  $T_e$  entre  $-96.7$  et  $-70.8^\circ\text{C}$ , des  $T_{mice}$  entre  $-55.3$  et  $-7.20^\circ\text{C}$ , des  $T_{h(L\rightarrow V)}$  entre  $150$  et  $270^\circ\text{C}$  et des  $T_{mh}$  à  $217.7$  et  $332^\circ\text{C}$ . L'étude des inclusions fluides LVS dans la gangue carbonatée (Calc 4) décrit des températures des  $T_e$  entre  $-96.8$  et  $-58.4^\circ\text{C}$ , des  $T_{mice}$  entre  $-57$  et  $-17.4^\circ\text{C}$ , des  $T_{h(L\rightarrow V)}$  entre  $143$  et  $276.7^\circ\text{C}$  et des  $T_{mh}$  entre  $211.7$  et  $345.7^\circ\text{C}$ .
- Les inclusions fluides de type LVS au sein de la gangue siliceuse (Qtz 2) des veines indiquent des  $T_e$  entre  $-98.5$  et  $-70.9^\circ\text{C}$ , des  $T_{mice}$  entre  $-46.3$  et  $-5.3^\circ\text{C}$ , des  $T_{h(L\rightarrow V)}$  entre  $119.6$  et  $267^\circ\text{C}$  et des  $T_{mh}$  à  $231.4$  et  $315.7^\circ\text{C}$ . Les inclusions fluides de type LVS au sein de la gangue carbonatée (Calc 4.2) montrent des  $T_e$  entre  $-87.6$  et  $-63.8^\circ\text{C}$ , des  $T_{mice}$  entre  $-48.9$  et  $-3.2^\circ\text{C}$ , des  $T_{h(L\rightarrow V)}$  entre  $192.7$  et  $251.8^\circ\text{C}$ , et des  $T_{mh}$  entre  $208.4$  et  $246.4^\circ\text{C}$ .

Le diagramme de fréquence des températures dans les inclusions fluides des trois structures étudiées (Figure III.12) récapitule les différentes températures d'homogénéisation des inclusions fluides triphasées. Les courbes de tendances utilisées avec une période de 2 sont présentées sur chaque diagramme (Figure III.13, Figure III.14 et Figure III.15). Les inclusions fluides triphasées des deux gangues des minéralisations massives montrent des  $T_h$  plus élevés (jusqu'à  $360^\circ\text{C}$ ) ; tandis que les IFs inclus dans les poches ont les températures les plus froides (jusqu'à  $140^\circ\text{C}$ ).

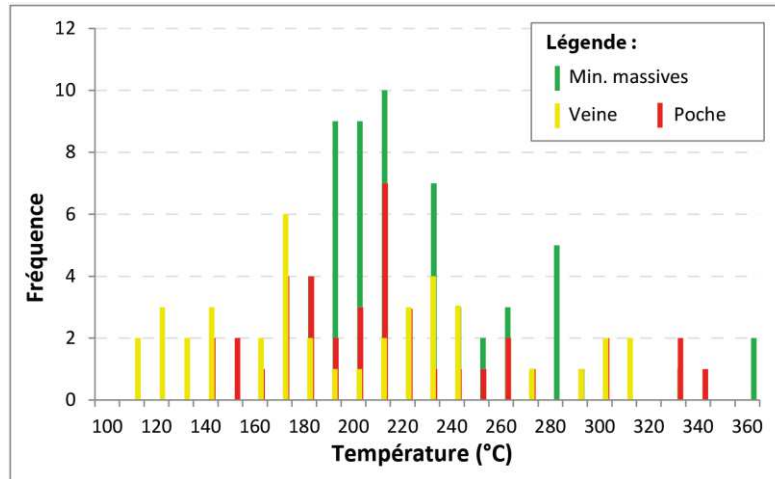


Figure III.12 : Diagramme de fréquence des températures d'homogénéisation dans les trois structures étudiées

- 1) Globalement, la température d'homogénéisation des inclusions des deux gangues des minéralisations massives montrent un pic de température à 220°C. L'étalement des températures est important, il varie de 180°C à 369 °C (Figure III.13A). La figure III.13B sépare les températures obtenues dans les inclusions fluides en fonction de la gangue minérale : le quartz et la calcite. Il est observé une différence de température entre les deux gangues. Le pic de température autour de 220 °C apparaît uniquement dans la gangue de calcite (Calc 2.1 et 2.2), tandis que les IFs incluses dans les quartz (Qtz 1) indiquent des températures plus froides autour de 200°C et un étalement des températures plus important (jusqu'au 360 °C).

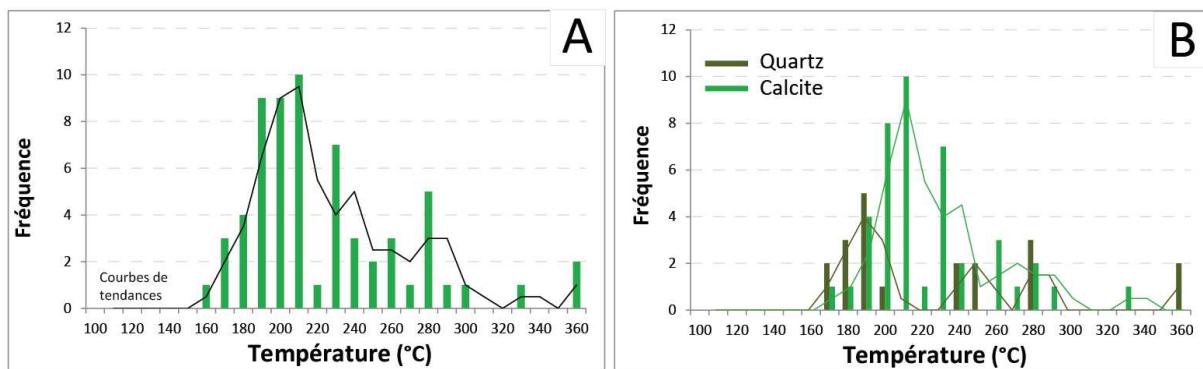


Figure III.13 : Diagramme de fréquence A) des températures d'homogénéisation dans les inclusions fluides triphasées des minéralisations massives, B) les deux gangues sont distinguées afin de voir les différentes températures obtenues

- 2) La courbe de tendance issue des fréquences des températures des inclusions au sein des gangues des poches indique des températures variées avec des pics autour de 190°C, 230°C et 260°C (Figure III.14A). La distinction entre les deux gangues encaissant les inclusions fluides est faite dans la Figure III.14B. Les températures les plus froides correspondent au quartz en peigne (Qtz 2) associés au stade à cobalt à environ 160-180 °C. Des températures autour de

220°C correspondent aux inclusions fluides triphasées incluses dans la calcite associée à l'arrivée du stade à fer et sulfures (Calc 4.2). Les deux minéraux de gangue montrent des IFs avec des températures allant jusqu'à 340°C (Figure III.14B).

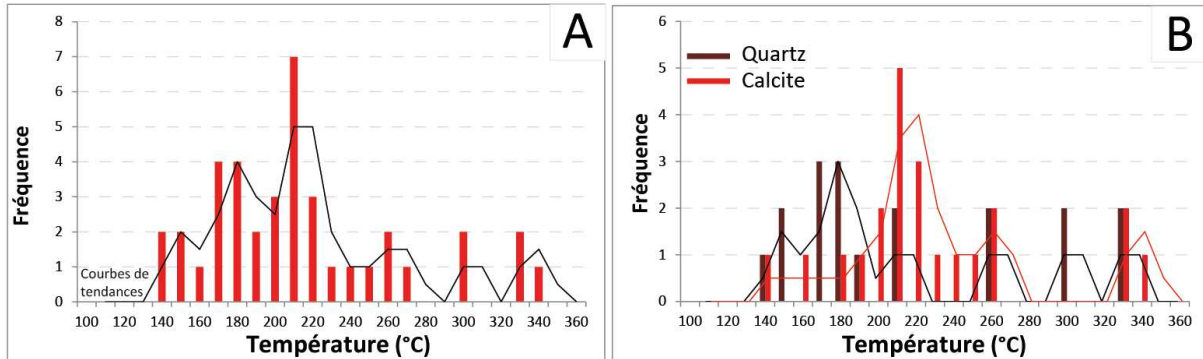


Figure III.14 : Diagramme de fréquence A) des températures d'homogénéisation dans les inclusions fluides triphasées des poches géodiques, B) les deux gangues sont distinguées afin de voir les différentes températures obtenues.

- 3) Les inclusions au sein des minéraux des veines décrivent des températures d'homogénéisation également étalées de 119.6°C et 240°C, avec quelques inclusions fluides à des températures de 320°C (Figure III.15A). La distinction entre les minéralisations encaissant les inclusions fluides est visible dans la Figure III.15B. Il est observé un pic de températures à 170 °C dans le quartz et à 220°C dans la calcite associée aux minéralisations d'arséniures de Fe et de sulfarséniures de Fe (Calc 4.2).

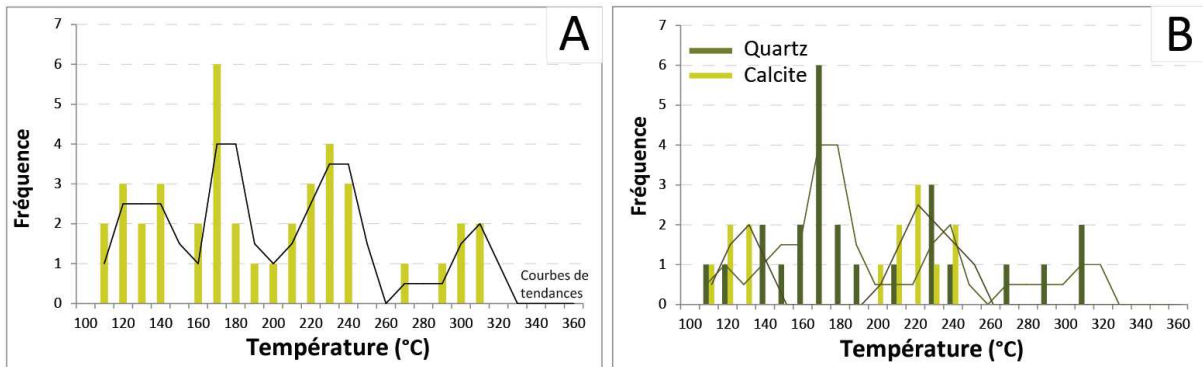


Figure III.15 : A) Fréquence des températures d'homogénéisation dans les inclusions fluides triphasées des veines, B) les deux gangues sont distinguées afin de voir les différentes températures obtenues.

### b) Étude de la salinité

La salinité des inclusions fluides LVS du système  $H_2O-NaCl-CaCl_2$  a été calculée à l'aide du programme de calcul Excel de Steele-MacInnis et al. (2010) en utilisant la  $T_{mice}$  et  $T_{mh}$  pour les inclusions LVS et  $T_{mice}$  et  $T_h$  pour les inclusions VL. Le diagramme III.16 montre la température observée et la salinité calculée en fonction de l'évolution paragenétique dans les inclusions fluides de type LVS et VL. Il est observé une diminution générale de la température en passant des minéralisations massives aux veines, on peut noter un phénomène similaire pour la teneur en NaCl et une augmentation en  $CaCl_2$  durant l'évolution paragenétique.

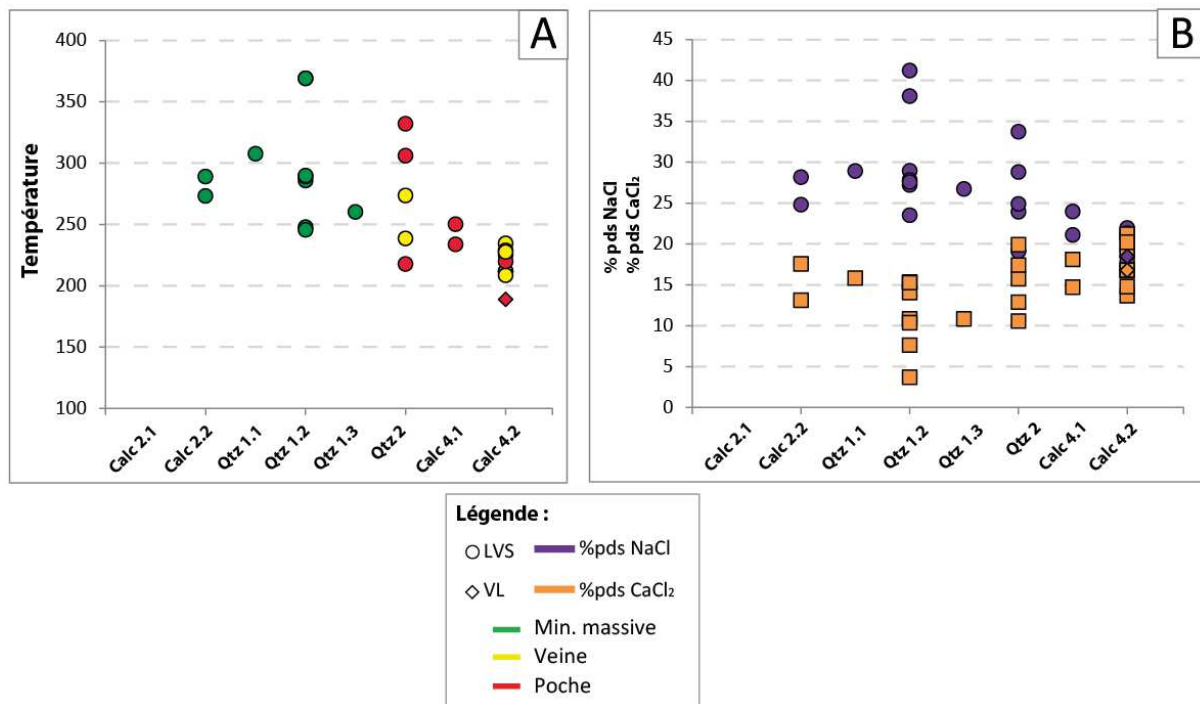


Figure III.16 : Diagramme de la température et de la salinité calculée en fonction du temps, selon la paragenèse des minéraux de gangues étudiés (données microthermométriques) (d'après Steele-MacInnis et al., 2010)

- Les inclusions LVS des minéralisations massives montrent des teneurs en NaCl et en  $CaCl_2$  ne variant pas au cours du temps de la gangue carbonatée vers la gangue siliceuse. Elle oscille entre 24.8 et 41.2 % eq. NaCl et 3.7 et 15.8 % eq.  $CaCl_2$  (Tableau III.2, Figure III.16). Les inclusions fluides de type de LVS de la gangue siliceuse montrent tout de même des teneurs en NaCl et  $CaCl_2$  plus élevées par rapport à la gangue carbonatée.
- Les inclusions LVS des poches décrivent des teneurs variant entre 19.1 jusqu'à 33.7 % eq. NaCl et entre 19.9 jusqu'à 10.6 % eq.  $CaCl_2$  (Tableau III.1). La quantité de  $CaCl_2$  augmente au cours de l'évolution des minéralisations et est inversement corrélée à la teneur en NaCl

(Figure III.16B). Une inclusion de type VL indique une salinité de 18.4 % eq. NaCl et 16.8 % eq. CaCl<sub>2</sub> dans la calcite (Calc 4.2).

- Les inclusions des veines décrivent des teneurs en NaCl moins importantes par rapport aux à celles des minéralisations massives, passant de 23.9 à 17.9 % eq. NaCl (Figure III.16B). Inversement, la teneur en CaCl<sub>2</sub> augmente de 12.9 à 21.2 % eq. CaCl<sub>2</sub>. La salinité calculée dans le quartz (Qtz 2) est la plus élevée par rapport à la calcite (Calc 4.2).

**Tableau III.1 : Tableau de données des teneurs en eq. NaCl et CaCl<sub>2</sub> d'après le programme de Steele-MacInnis et al., (2010)**

Zone	Type	Lame	T <sub>mice</sub> (°C)	T <sub>h(L-&gt;v)</sub> (°C)	T <sub>mh</sub> (°C)	NaCl		NaCl %pds	CaCl <sub>2</sub> %pds	Minéral
						NaCl+CaCl <sub>2</sub>	%pds			
Min. massive	LVS	BAE21b - Fa	-47		273	0,6	42,4	24,8	17,6	CALC 2.2
	LVS	BAE21b - Ga	-33,9		289	0,7	41,3	28,2	13,1	CALC 2.2
	LVS	BAE46c - G	-48,5		307,5	0,7	44,7	28,9	15,8	QTZ 1.1
	LVS	BAE46c - A	-29,4		285,7	0,7	39,8	28,9	10,8	QTZ 1.2
	LVS	BAE46c - A	-40,7		289	0,6	42,6	27,2	15,4	QTZ 1.2
	LVS	BAE46c - A	-36,4		289,8	0,7	41,9	27,8	14,0	QTZ 1.2
	LVS	BAE46c - A	-34,7		247,7	0,6	38,7	23,5	15,3	QTZ 1.2
	LVS	BAE46c - A	-24		369	0,9	44,9	41,2	3,7	QTZ 1.2
	LVS	BAE46c - A	-39,3		369	0,8	48,4	38,1	10,3	QTZ 1.2
	LVS	BAE46c - A	-25,1		245,4	0,8	35,2	27,6	7,6	QTZ 1.2
	LVS	BAE46c - B	-28,3		260	0,7	37,5	26,7	10,8	QTZ 1.3
Poche	LVS	BAE59a1 - I	-45		217,7	0,5	39,0	19,1	19,9	QTZ 2
	LVS	BAE59a1 - I	-47,5		306	0,7	44,5	28,8	15,7	QTZ 2
	LVS	BAE59a1 - I	-32,6		332	0,8	44,3	33,7	10,6	QTZ 2
	LVS	BAE59a1 - J	-33,7		250	0,6	38,6	23,9	14,7	CALC 4.1
	LVS	BAE68f2 - L	-40,9		233,7	0,5	39,2	21,1	18,1	CALC 4.1
	LVS	BAE59a1 - L	-30		211,7	0,6	35,2	21,6	13,7	CALC 4.2
	LV	BAE59a1 - L	-33,6	188,7		0,5	35,2	18,4	16,8	CALC 4.2
Veine	LVS	BAE70a - A	-30		238,4	0,7	36,8	23,9	12,9	QTZ 2
	LVS	BAE70a - A	-46,3		273,5	0,6	42,3	24,9	17,4	QTZ 2
	LVS	BAE3 - A	-32,2		225,1	0,6	36,7	21,9	14,8	CALC 4.2
	LVS	BAE3 - A	-45,8		234,5	0,5	40,0	20,7	19,3	CALC 4.2
	LVS	BAE3 - A	-48,9		208,4	0,5	39,0	17,9	21,2	CALC 4.2
	LVS	BAE3 - B	-46,7		219,7	0,5	39,3	19,1	20,2	CALC 4.2
	LVS	BAE3 - B	-36,3		228,7	0,6	38,0	21,3	16,7	CALC 4.2
	LVS	BAE3 - B	-36,4		227,4	0,6	38,0	21,2	16,8	CALC 4.2

La salinité (NaCl) et les températures (T<sub>mh</sub>) montrent une corrélation positive dans la figure III.17A. Ce graphique indique qu'en passant des amas aux veines (évolution paragenétique) la salinité et la température diminuent. Le diagramme T<sub>mh</sub> vs. T<sub>h</sub> est construit avec les valeurs des inclusions fluides de type LVS de chaque structure (Figure III.17B). Ce diagramme montre que les inclusions fluides comprises dans les structures minéralisées ont des T<sub>mh</sub> supérieures au T<sub>h</sub>, exceptées pour trois inclusions LVS, ce qui montre que ce fluide a été piégé dans un environnement saturé en NaCl. Il est important de noter que la température a été établie par la dissolution de la halite pour la plupart des inclusions LVS.

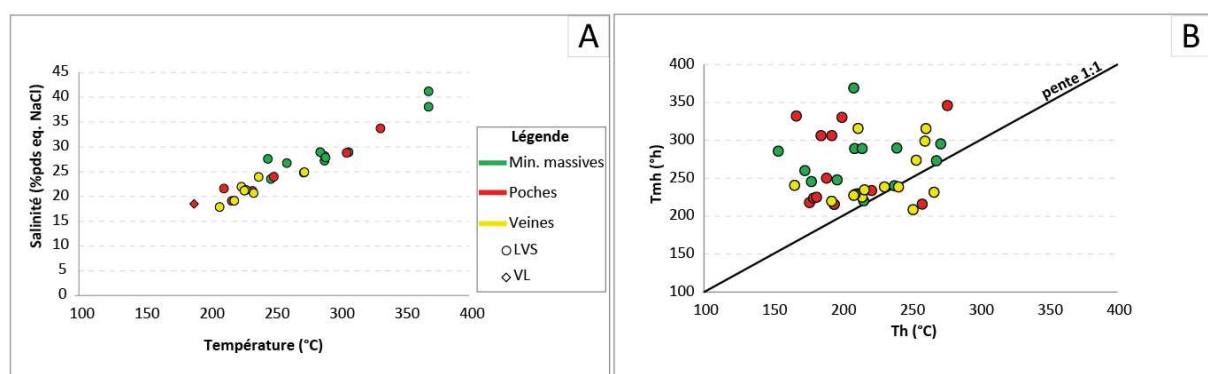


Figure III.17 : A) Diagramme salinité *versus* température ( $T_{mh}$ ). B) Diagramme température d'homogénéisation ( $T_h$ ) *versus* température de fusion de la halite ( $T_{mh}$ ) (Données microthermométrique) (IF : d'inclusion fluide, LVS : liquide-vapeur-cube de halite, VL : liquide-vapeur dominante, min. massive : minéralisations massives,  $T_h$  : température d'homogénéisation) (la salinité a été calculée d'après Steele-MacInnis et al., 2010)

### c) Calcul des isochores

Les pressions minimales de piégeage du fluide ont été calculées selon le programme excel de Steele-MacInnis et al. (2012) dans le système  $H_2O-NaCl$ , car il n'a pas été possible d'utiliser un système complexe  $H_2O-NaCl-CaCl_2$ . Le diagramme III.18 propose la comparaison entre l'évolution paragenétique des gangues et les pressions obtenues. Pour les minéralisations massives, les pressions obtenues dans les LVS varient entre 4 et 43 bars (Figure III.18). Les inclusions fluides encaissées dans les gangues des veines montrent des pressions entre 5 et 20 bars (Figure III.18 et tableau 3). Les inclusions LVS des poches indiquent des pressions plus faibles oscillant entre 11 et 34 bars (Figure III.18). Une augmentation de la pression est observée au début de la mise en place des veines (Figure III.18). Les pressions sont globalement hétérogènes dans les différents objets.

Tableau III.2 : Tableau de données des températures et des pressions calculées et estimées A) des minéralisations massives, B) des veines et C) des poches

Zone	Lame	Conditions du fluide			Conditions de piégeage		Minéral
		Th (°C)	Tmh (°C)	P (bar)	T (°C)	P (bar)	
Min. massives	BAE21b - Fa	268,7	273	43	294	400	CALC 2.2
	BAE21b - Ga	209,4	289	14	230	400	CALC 2.2
	BAE46c - A	154,0	285	4	172	400	QTZ 1.2
	BAE46c - A	214,9	289	16	236	400	QTZ 1.2
	BAE46c - A	240,0	289	26	263	400	QTZ 1.2
	BAE46c - A	196,7	247	12	217	400	QTZ 1.2
	BAE46c - A	208,8	369	11	158	400	QTZ 1.2
	BAE46c - A	178,0	245	7	197	400	QTZ 1.2
	BAE46c - B	173,3	260	7	192	400	QTZ 1.3
Poches	BAE59a1 - I	176,6	217	8	196	400	QTZ 2
	BAE59a1 - I	192,8	306	10	213	400	QTZ 2
	BAE59a1 - I	167,0	332	5	126	400	QTZ 2
	BAE59a1 - J	189,0	250	10	209	400	CALC 4.1
	BAE59a1 - L	221,7	211	20	244	400	CALC 4.2
Veines	BAE70a - A	231,0	238	23	254	400	QTZ 2
	BAE70a - A	254,0	273	34	278	400	QTZ 2
	BAE3 - A	214,8	225	17	236	400	CALC 4.2
	BAE3 - A	216,5	234	18	238	400	CALC 4.2
	BAE3 - A	192,7	208	11	213	400	CALC 4.2
	BAE3 - B	209,7	219	16	231	400	CALC 4.2
	BAE3 - B	208,7	228	16	230	400	CALC 4.2

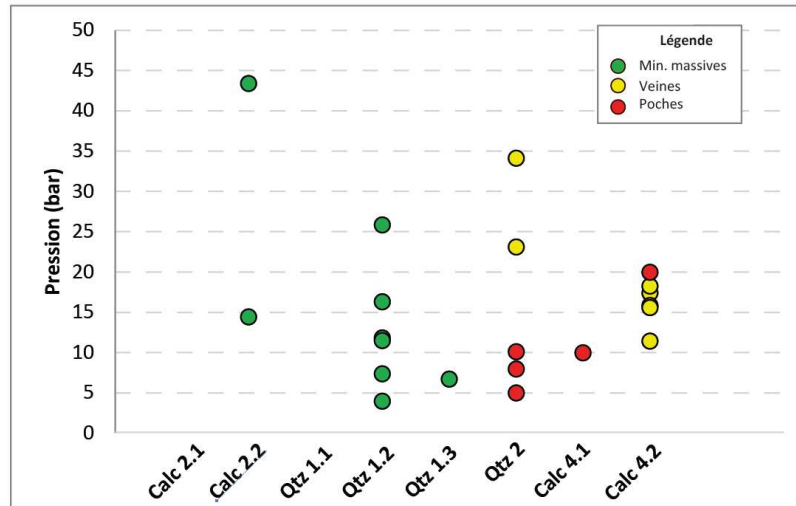


Figure III.18 : Diagramme de la pression en fonction de l'évolution paragenétique des minéralisations de Bou Azzer

Les isochores pour chaque système d'inclusions fluides sont les courbes pression/température suivies par les inclusions. Elles construisent les limites de phase ainsi que les trajectoires pression-température lors de l'homogénéisation de l'inclusion. Elles ont également été calculées à partir des équations proposées par Steele-MacInnis et al. (2012) dans le système H<sub>2</sub>O-NaCl. Les pressions calculées par le programme proviennent des études d'Atkinson (2002) et de Bodnar & Vityk (1994) correspondent aux pressions des inclusions fluides LVS individuelles. Les isochores associées aux données de pression et de températures sont visibles sur la figure III.18. Les données des pressions et des températures correspondantes sont répertoriées dans le Tableau III.3.

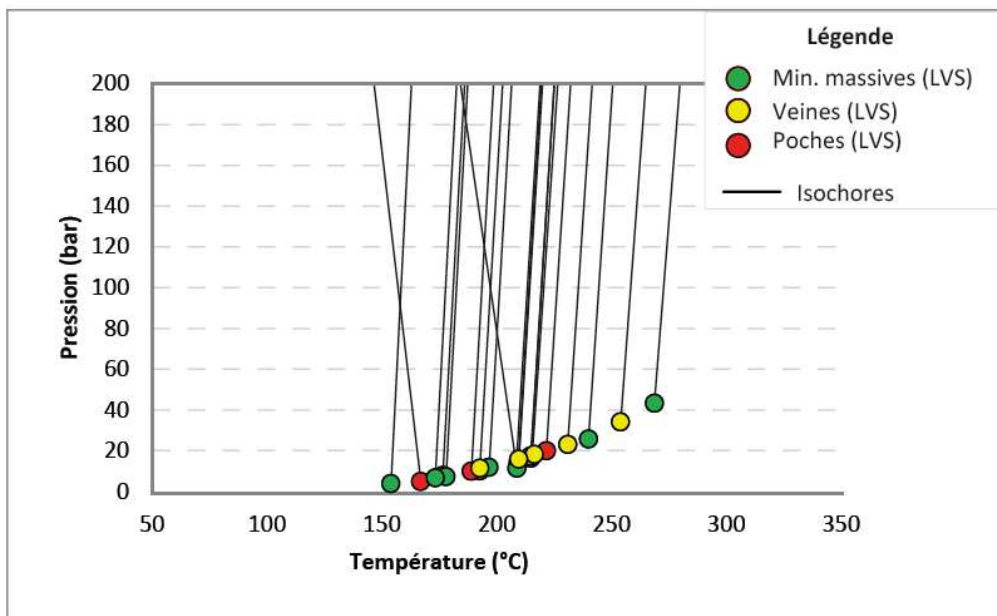


Figure III.19 : Diagrammes P/T dans lesquels les isochores des inclusions fluides ont été représentées. Les pressions et les isochores ont été calculées d'après le programme excel de Steele-MacInnis et al., 2012



#### 4. Données Raman

La spectrométrie Raman de la phase vapeur de ces inclusions a mis en évidence la présence de  $\text{CH}_4$ , dans les inclusions fluides LVS et VL des minéralisations massives, visible par le pic de  $2900\text{ cm}^{-1}$  (Annexe III.2A-B et III.). La présence de méthane indique des conditions réduites à la formation des IFs. La présence d' $\text{H}_2\text{O}$  dans le liquide est visible, également par la courbe au niveau du pic  $3300$  à  $3500\text{ cm}^{-1}$ . Un bruit de fond due à la calcite encaissante est également détecté au début des spectres avec des pics à  $155$ ,  $282$  et  $711\text{ cm}^{-1}$ . La spectrométrie Raman n'a pas donné de résultat de composition pour les phases vapeurs des inclusions des poches et des veines.

#### 5. Les inclusions solides

Lors du traitement des données effectuées sur des inclusions fluides compris au sein des gangues des différents types de minéralisations, des inclusions solides ont été identifiées (Figures III.21A, III.21B et III.22) :

- des inclusions minérales sont incluses dans l'inclusion (Figure III.20A) ou en bordure (Figure III.20B) mais non pas pu être identifiées. Ces inclusions sont essentiellement composées de fer, de magnésium, de nickel et de lithium d'après le spectre d'analyse (Figure III.20C).

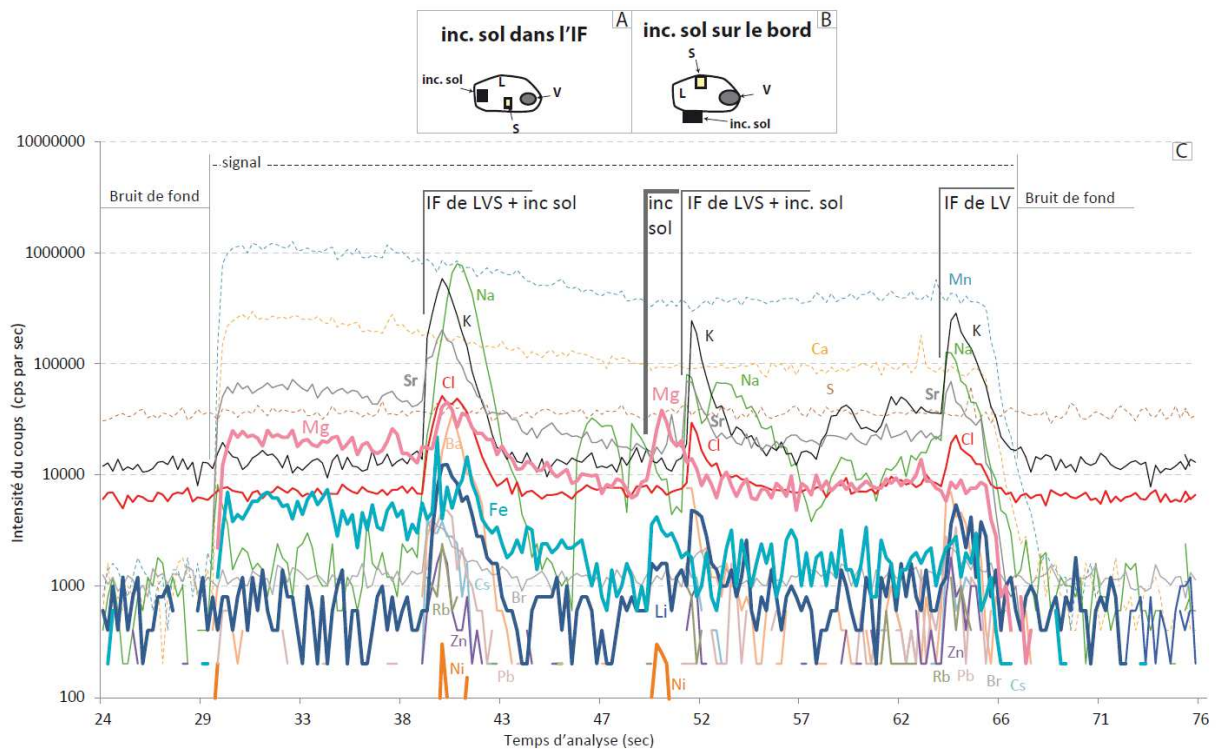


Figure III.20 : Spectre d'analyses de l'intensité de coups des éléments en fonction du temps d'inclusions solides au sein d'une gangue carbonatée. Le signal de l'analyse des inclusions fluides triphasées et biphasées est observé sur ce spectre (inc. Sol : inclusion solide, IF : inclusion fluide, LVS : Liquide-vapeur-cube de halite)

- des inclusions solides essentiellement composées de Na, Cl, Pb, Sr (Figure III.21) ont été observées dans la gangue siliceuse (Qtz 1) des minéralisations massives et la gangue carbonatée (Calc 4.1) des poches. Ces inclusions sont composées de 85% eq. NaCl (Annexe III.4) et sont parfois associées à des inclusions monophasées de vapeur, qui ont été analysées mais qui ne donnaient pas de résultat en spectrométrie Raman (Figure III.22). Les inclusions de NaCl sont parfois accompagnées d'inclusions de Pb, Sr (Figure III.21). Les analyses de ces inclusions riches en halite ont été obtenues au laser LA-ICP-MS. Les compositions des inclusions individuelles sont présentées en Annexe III.4.

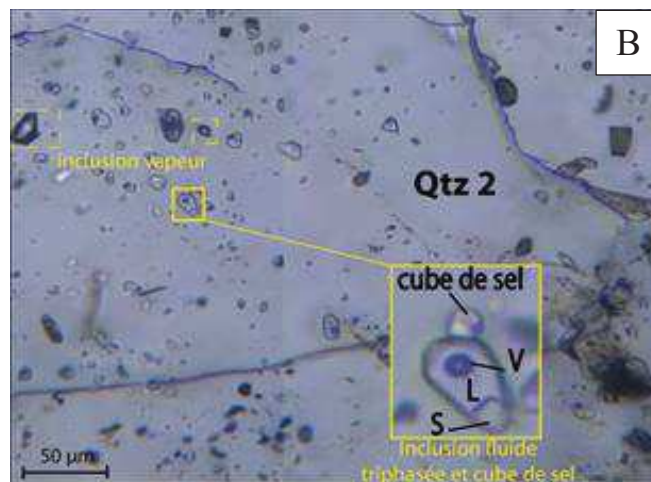
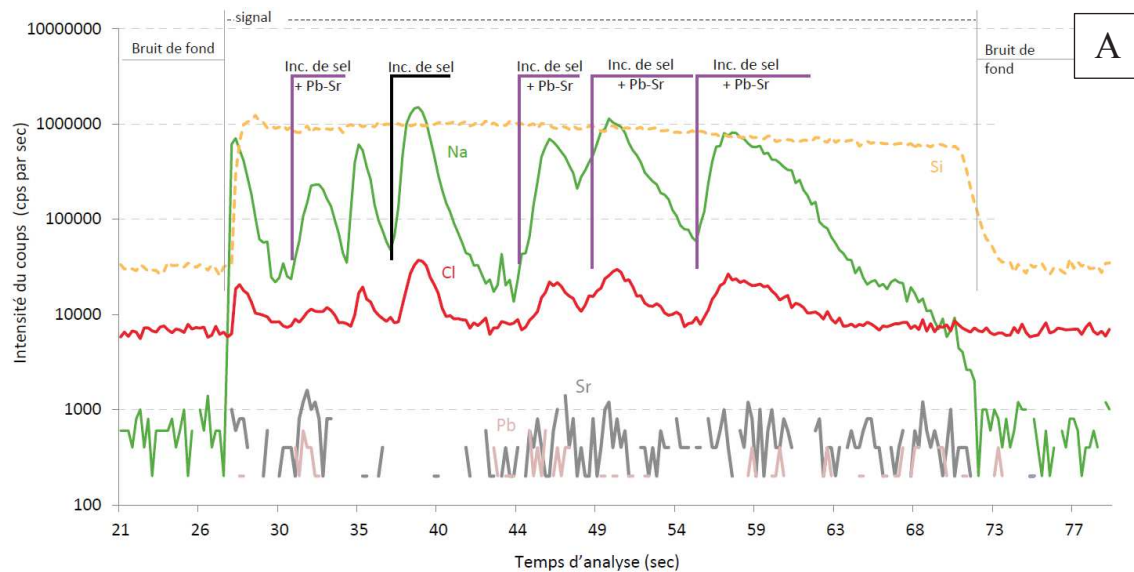


Figure III.21 : A) Spectre des analyses des inclusions solides de halite dans la gangue siliceuse des minéralisations massives et B) photo décrivant les inclusions riches en halite (Données LA-ICP-MS)

## D. Analyses in-situ des fluides par LA-ICP-MS

### 1. Concentrations en éléments « majeurs et traces » des IFs

L'analyse en éléments majeurs, en traces et en métaux (cf III.B.5) a été réalisée pour les inclusions fluides des différentes structures exploitées à Bou Azzer. Toutes les inclusions LVS analysées sont enrichies en Na, K, B, Li, Ba, Br, Cl et Sr (Figure III.23, Annexe III.3). Celles analysées dans la gangue siliceuse sont également enrichies en Ca. Les concentrations représentent les moyennes et les écart-types associés des analyses des inclusions fluides LVS. Un schéma récapitulatif des différentes structures qui encaissent les minéralisations de Bou Azzer en fonction de la formation des métaux est visible en bas de la figure III.23.

Les concentrations en *calcium* sont uniquement obtenues dans les inclusions fluides des gangues siliceuses des minéralisations massives (Qtz 1) et dans le quartz en peigne formé dans les veines et les poches (Qtz 2), car le Ca, élément principal de la calcite, a été utilisé comme élément de correction de la matrice lorsque les analyses ont été faites dans ce minéral. Les concentrations en Ca calculées dans les quartz sont variées de quelques centaines de ppm au %poids dans les IFs des trois structures (Figure III.22A). Le traitement des concentrations de calcium issues des analyses LA-ICP-MS sur le logiciel SILLIS montre des données non cohérentes avec la réalité. Le piégeage du fluide des IFs, défini dans le système H<sub>2</sub>O-NaCl-CaCl<sub>2</sub>, peut expliquer ces concentrations trop importantes, qui n'ont pas pu être corrigées par le logiciel. Le *sodium* et le *potassium* sont homogènes en composition dans les inclusions fluides (Figure III.22B et C). Les concentrations en *bore* sont homogènes entre les différentes générations de minéraux malgré de fortes variabilités locales, notamment dans les poches. Ceci est lié aux inclusions riches en halite qui sont très appauvries en B. Les teneurs en *lithium* et *baryum* diminuent de la gangue carbonatée à la gangue siliceuse (Figures III.23F et G). Les IFs analysées dans Qtz 1 ont des concentrations en Li entre 22 et 1032 ppm (Figure III.23E). Les teneurs en Li et Ba augmentent lors de la formation des veines et des poches. Une nette augmentation est observée jusqu'à 13168 ppm en Li dans le Qtz 2 des poches et jusqu'à 2.5% en Ba dans le Qtz 2 des veines. Le *brome* et le *strontium* décrivent le même comportement que le potassium, le lithium et le baryum. Les concentrations dans les inclusions fluides varient, cependant, de façon significative (entre 264 ppm et 4.1% pour le brome et 0.3% et 10.2% en strontium) (Figure III.23G et I). Le chlore montre des concentrations non cohérentes avec la réalité, comme pour le calcium. Ces inclusions fluides sont de type LVS, le traitement SILLIS n'a pas pu corriger ces concentrations trop importantes.

Les teneurs en éléments traces ont été normalisées aux cations principaux constituant les inclusions fluides de Bou Azzer : le calcium, le sodium et le potassium. Cette normalisation permet d'enlever l'impact de la salinité sur les compositions des inclusions fluides (Figure III.23 et III.24). La salinité n'influence pas le comportement des éléments en traces dans le fluide.

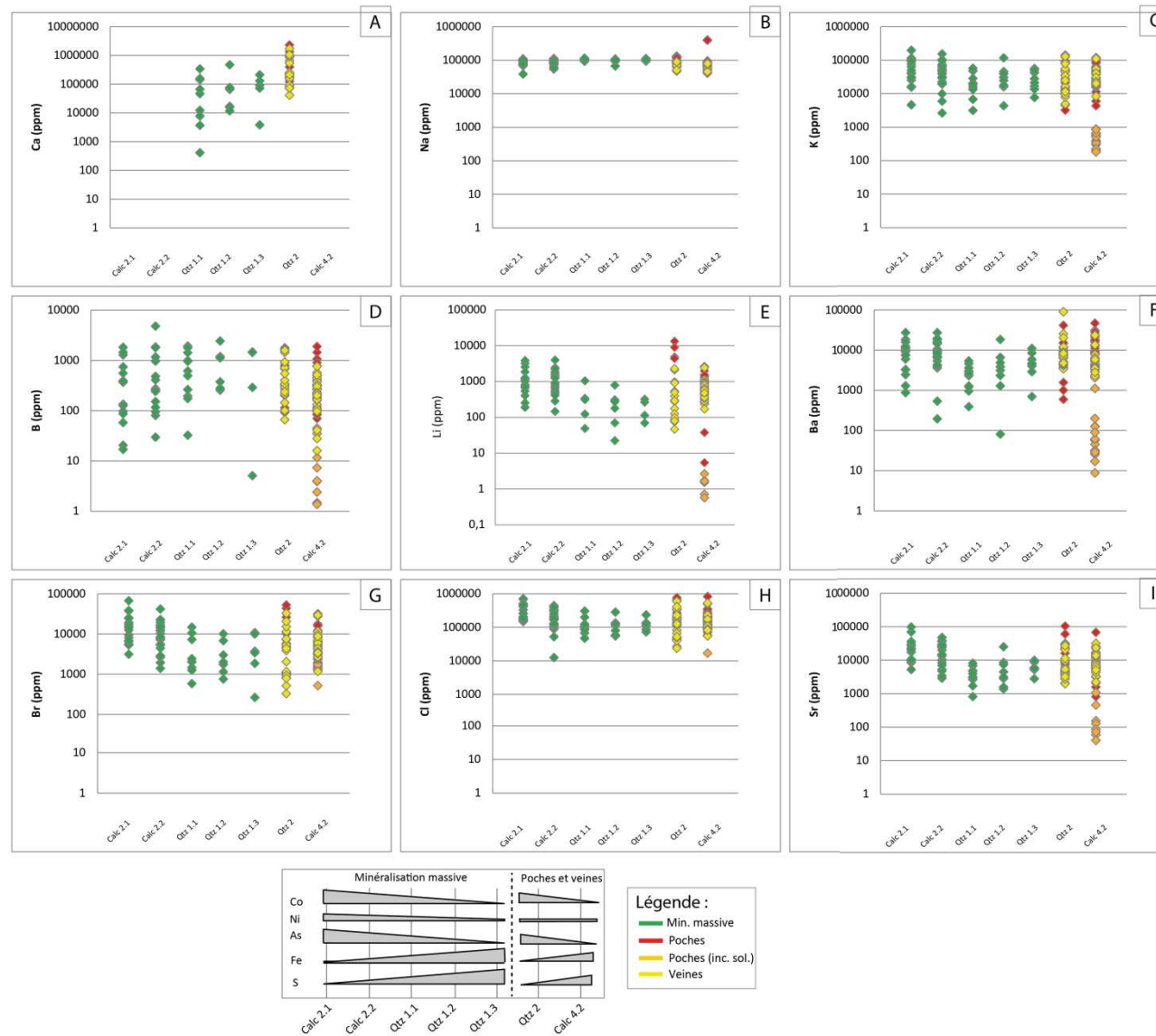


Figure III.22 : Composition en éléments en traces des fluides des minéralisations de Bou Azzer en fonction de la paragenèse et des gangues encaissantes A) Calcium, B) Sodium, C) Potassium, D) Bore, E) Lithium, F) Baryum, G) Brome, H) Chlore, et I) Strontium. A côté de la légende, schéma synthétique de rappel des paragenèses des minéralisations de Bou Azzer. (Données LA-ICP-MS) (Calc : calcite, Qtz : Quartz, Min. massive : minéralisations massives)

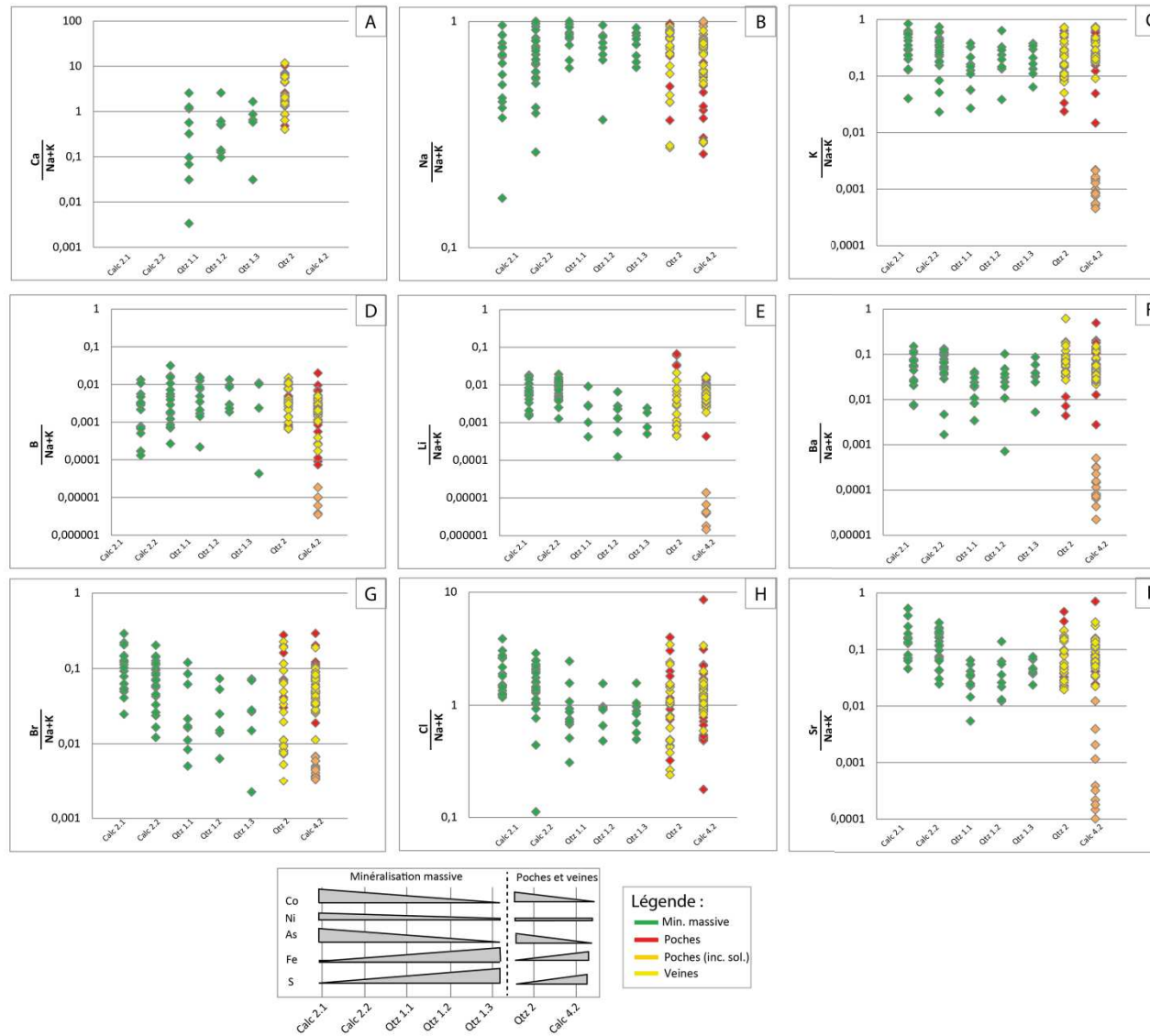
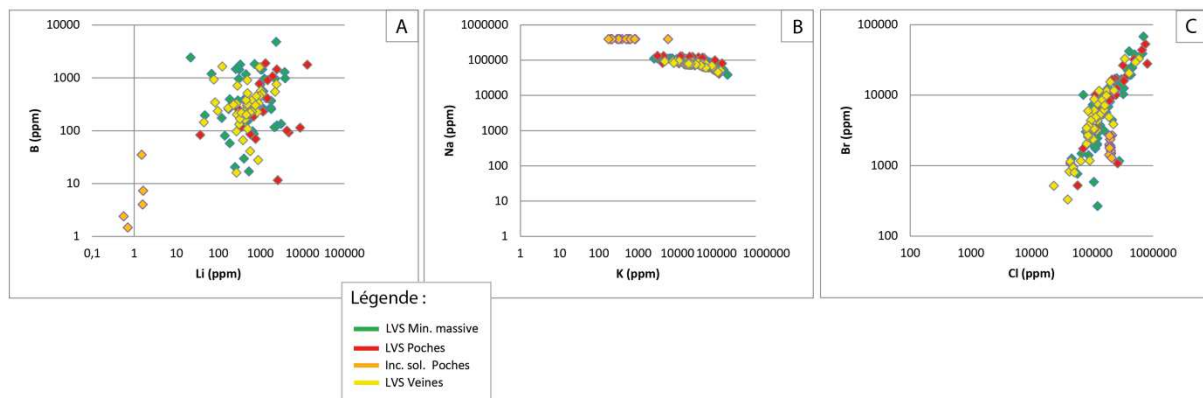


Figure III.23 : Diagramme identique mais prenant en compte la normalisation au sodium et au potassium. A) Calcium, B) Sodium, C) Potassium, D) Bore, E) Lithium, F) Barium, G) Brome, H) Chlore et I) Strontium. A côté de la légende, tableau simplifié de la paragenèse des minéralisations de Bou Azzer (Données LA-ICP-MS) (Calc : calcite, Qtz : Quartz, Min. massive: minéralisations massives)

## 2. Distribution et teneurs relatives des éléments « majeurs et traces » dans les IFs

Les relations entre certains éléments sont mises en comparaison afin d'essayer d'identifier les corrélations potentielles entre éléments constituant le fluide minéralisateur (Figure III.24). Les diagrammes Li vs B (Figure III.24A), Na vs K (Figure III.24B) et Cl vs Br (Figure III.24C) décrivent des corrélations positives pour les inclusions fluides de type LVS des trois structures minéralisées. Les analyses des IFs encaissées dans les minéralisations massives ont des concentrations hétérogènes en Li et B ; contrairement aux analyses effectuées dans les inclusions fluides des poches et des veines. Ces données mettent en avant une signature particulière du fluide minéralisateur. Les inclusions solides observées dans les poches ne possèdent pas le même comportement que les IFs dans les minéralisations massives, les poches ou les veines. Il est donc intéressant de comparer ces signatures aux calcites encaissant les arséniures.



**Figure III.24 : Diagramme binaire des éléments en traces dans les inclusions fluides des différentes structures A) Li vs B, B) K vs Na, C) Cl vs Br (Données LA-ICP-MS) (LVS : liquide-vapeur-cube de halite, Min. massive : minéralisations massives)**

Les diagrammes ternaires présentent les différences entre les minéralisations massives, les poches et les veines (Figure III.25). Les IFs sont globalement enrichies en Sr. Les inclusions fluides et les inclusions de halite encaissées dans les poches montrent des variations en Br, ainsi qu'un enrichissement en Br. Les poches sont composées d'inclusions solides montrant des concentrations élevées en brome par rapport au Rb et au Sr (Figure III.25A). Les compositions des poches en Br et Sr sont plus homogènes que celle des minéralisations massives et des veines (Figure III.25A). Les compositions les plus élevées en Rb sont observées dans le quartz (Qtz 2) associé aux veines.

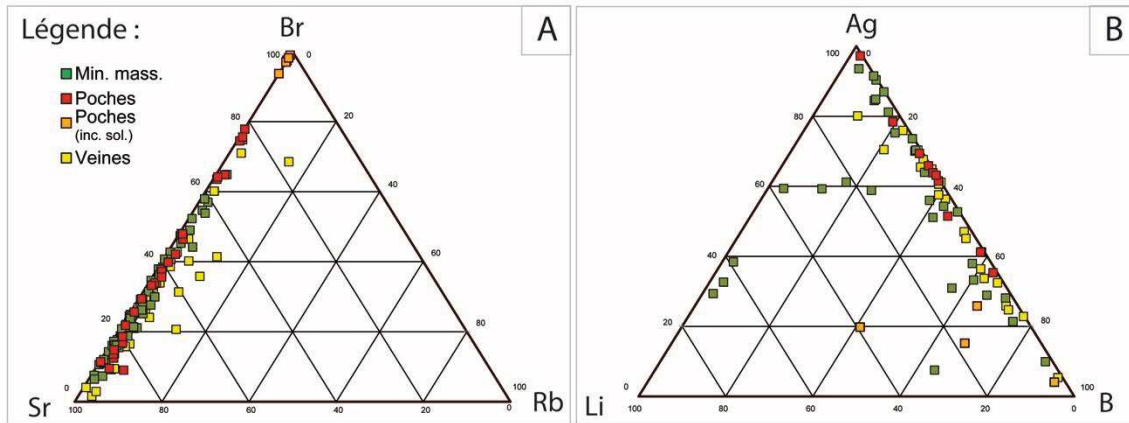


Figure III.25 : Diagramme ternaire des teneurs en brome, strontium et rubidium dans les IFs de LVS des minéralisations massives, des poches et des veines (Données LA-ICP-MS)

### 3. Analyses des « métaux » dans les IFs

L'analyse des métaux (Co, Ni, Fe, Zn, Cu, Pb, S, As et Ag) comparée à la paragenèse des minéraux encaissant les inclusions fluides permet de mettre en avant les variations en lien avec les stades minéralisateurs définis dans l'étude pétro-structurale (Figure III.3 et Figure III.26 ; Annexe III.3). L'étude des teneurs en Co, Ni et Fe dans les inclusions fluides de type LVS incluses au sein de gangues de quartz et de calcite des trois types de structures sera particulièrement observé. Pour rappel, les calcites qui sont associées au stade minéralisateur en Co est Calc 2.1 et au stade à Fe est Calc 2.2 (Figure III.26J). La gangue siliceuse (Qtz 1) associée aux minéralisations massives encaisse les minéralisations de Co et de Fe. Les poches et les veines sont composées de quartz en peigne (Qtz 2) associés au second stade à Co observé dans ces structures et poursuivit de la gangue carbonatée (Calc 4.2) associée au stade à arséniures de Fe et sulfures (Figure III.26).

- Les teneurs en métaux montrent de fortes variabilités de concentrations quel que soit la nature des IFs. Les concentrations en *cobalt* et en *fer* dans les inclusions fluides montrent une légère diminution des minéralisations massives jusqu'aux veines et aux poches (Figure III.26A et C). Le Co dans les IFs de type LVS des minéralisations massives varie entre 1 ppm et 288 ppm ; le Fe varie plus fortement entre 94 ppm et 7%. Les concentrations en *nickel* semblent homogènes (entre 10 et 3200 ppm) (Figure III.26B).
- Les teneurs en *zinc* montrent une forte variabilité entre quelques dizaines de ppm et des milliers de ppm (Figure III.27D, Annexe III.3). Les concentrations augmentent des minéralisations massives aux poches et aux veines. Une augmentation constante est visible dans les inclusions fluides triphasées allant de 14 à 6868 ppm de Zn de la gangue carbonatée (Calc 2.1 et 2.2) jusqu'à 9284 ppm de Zn dans la gangue siliceuse (Qtz 1.1) et 1.9 % de Zn environ dans la Calc 4.2 des veines et des poches (Figure III.26D). Le comportement du *cuivre* montre une variabilité de teneurs entre 1 ppm et 651 ppm (Figure III.26E). Les teneurs

en **plomb** dans les IFs décrivent la même évolution que celles du Co, Fe ou Cu. Cela se traduit par une homogénéisation des teneurs des minéralisations massives, aux poches et aux veines. Les concentrations en Pb varient donc de 13 à 2961 ppm (Figure III.26F).

- **Le soufre** décrit la même signature que le Zn, c'est-à-dire une augmentation globale des teneurs des minéralisations massives, aux veines et aux poches. Les valeurs en S varient de 60 ppm à 8% dans les minéralisations massives. La calcite (Calc 4.2), associée aux veines et aux poches se formant pendant le stade à Fe et à sulfure (Figure III.26G), indique les plus petites concentrations en S (entre 674 et 6537 ppm). **L'arsenic** et **l'argent** montrent la même dispersion des concentrations variant de 5 ppm à 7046 ppm en As (Figure III.26H) et de 1 ppm à 9166 ppm en argent (Figure III.26I).

Les teneurs en métaux ont été normalisées aux cations principaux composant les inclusions fluides : le Na et le K (Figure III.27). En comparant les signatures des métaux d'après l'évolution paragenétique, les mêmes dispersions des teneurs sont visibles (Figure III.27H).



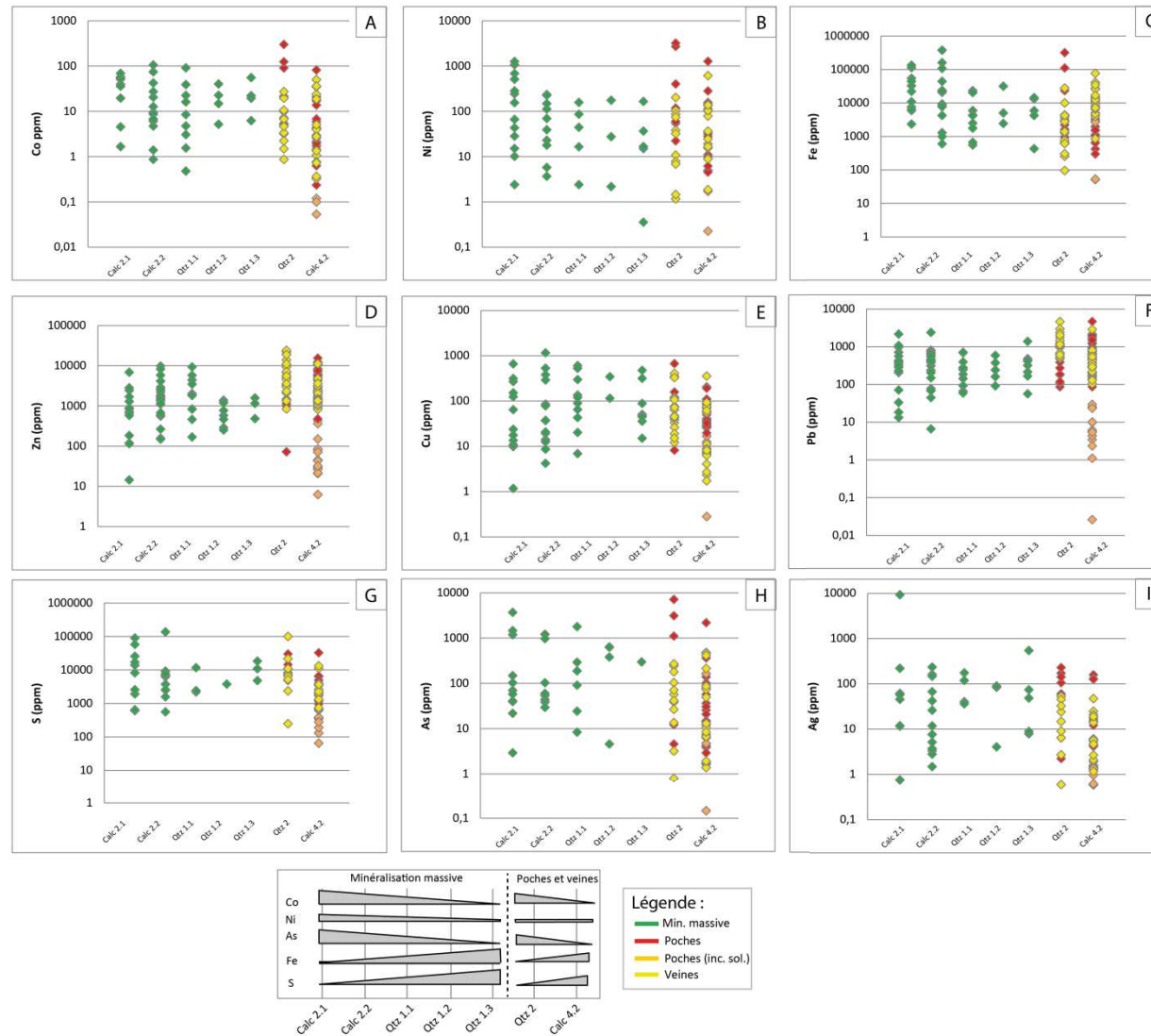


Figure III.26 : Teneurs en métaux dans les inclusions fluides de Bou Azzer – A) Cobalt, B) Nickel, C) Fer, D) Zinc, E) Cuivre, F) Plomb, G) Soufre, H) Arsenic et I) Argent. J) représente un tableau simplifié de la paragenèse des minéralisations de Bou Azzer (Données LA-ICP-MS) (min. : minéralisation, LVS : liquide-vapeur-cube de halite, VL : liquide-vapeur dominante, Co : cobalt, Ni : nickel, Fe : fer, As : Arsenic, S : soufre)

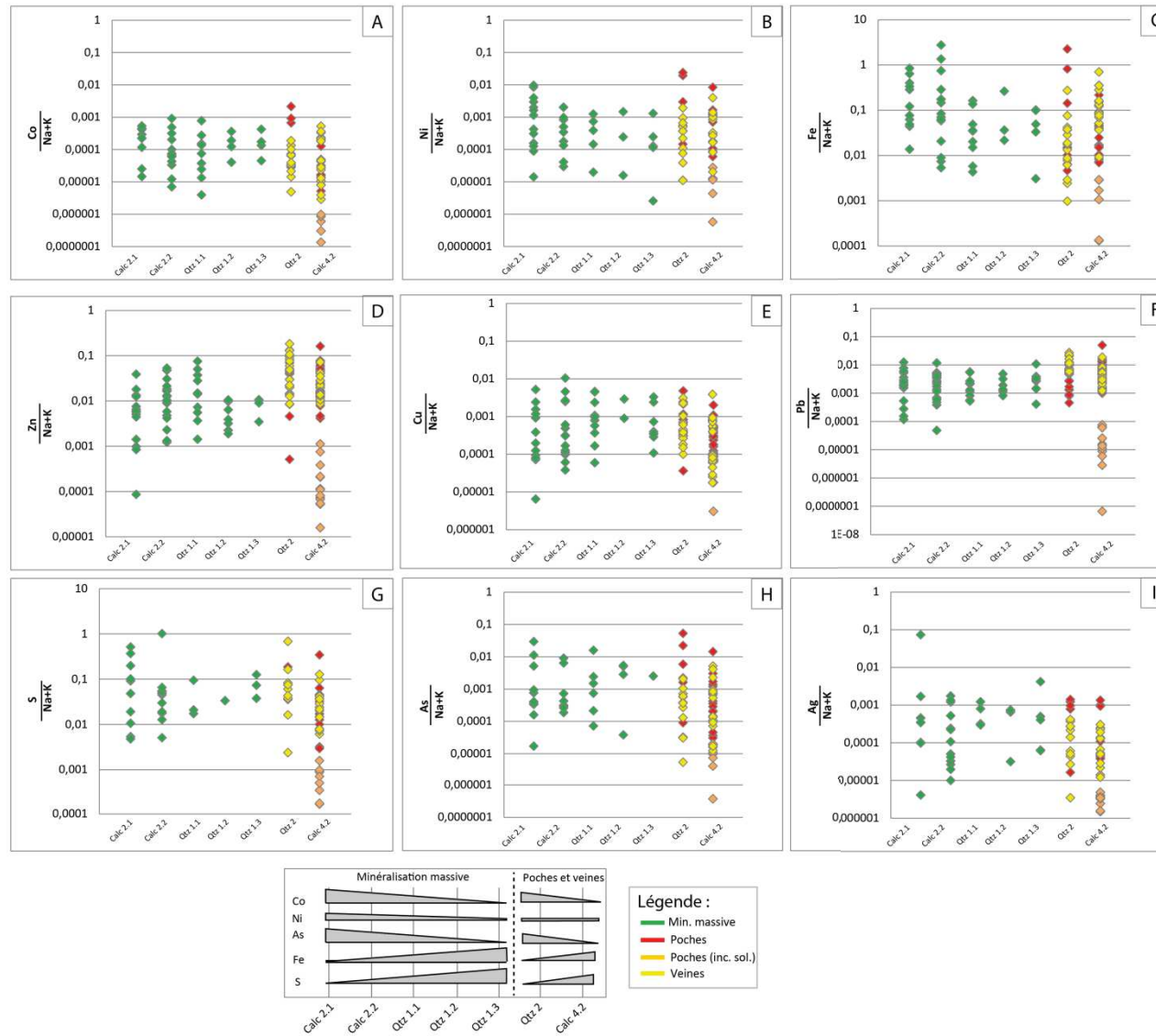
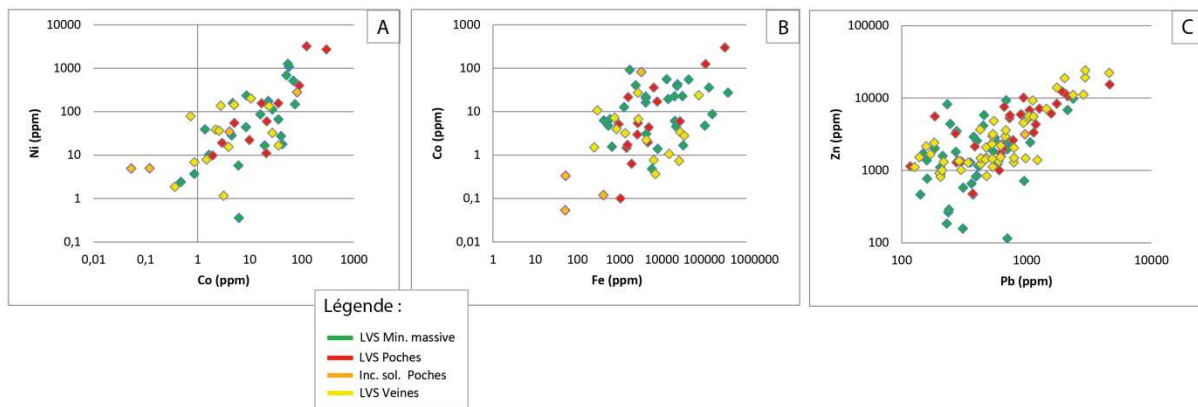


Figure III.27 : Teneurs en métaux normalisées à la salinité (Na+K) dans les saumures de Bou Azer. A) Cobalt, B) Nickel, C) Fer, D) Zinc, E) Cuivre, F) Plomb, G) Soufre, H) Arsenic et I) Argent. J) représente un tableau simplifié de la paragenèse des minéralisations de Bou Azer (Données LA-ICP-MS)

#### 4. Distribution et teneurs relatives des « métaux » dans les IFs

Les graphiques Ni vs Co, Co vs Fe et Zn vs Pb (Figure III.28A, B et C, respectivement) expriment une corrélation positive dans les inclusions fluides de type LVS. L'enrichissement en nickel est d'un ordre de grandeur plus important par rapport aux teneurs en Co dans les IFs de toutes les structures selon la droite de pente 1:1 (Figure III.28A). L'enrichissement en Fe dans les IFs est également plus important que les teneurs en Co de deux ordres de grandeurs (Figure III.28B). Globalement, on peut noter : i) un appauvrissement en cobalt et en fer est visible des minéralisations massives aux veines et aux poches (Figure III.28A et B); sauf en nickel, les concentrations au sein des poches est plus important (Figure III.28A) ; ii) les minéralisations massives sont moins enrichies en Zn que les veines ; et iii) les poches montrent des concentrations très riches à intermédiaires. L'intérêt est de comprendre la relation entre ces trois métaux, qui sont majoritaires dans le gisement de Bou Azzer. La substitution entre ces éléments a déjà été étudiée (Smedley et al., 2002) et mise en avant dans la figure III.29. La comparaison entre les différentes signatures des minéraux encaissant les minéralisations et du fluide sera discuté par la suite.



**Figure III.28: Diagrammes binaires entre A) nickel/cobalt et B) cobalt/fer dans les différentes inclusions fluides des structures étudiées (Données LA-ICP-MS)**

Le diagramme ternaire des teneurs en métaux présente les différences en termes de proportions entre le Cu-Co-Ni, Cu-Pb-Zn et S-Ag-As (Figure III.29). Aucune différence entre les trois structures et les différents types d'inclusion n'est observé en fonction des teneurs en Cu, Co et Ni (Figure III.29A). Les proportions en Ni et en Co sont plus importantes que le Cu. Les teneurs en Zn sont plus importantes dans les inclusions LVS des trois structures par rapport au Cu et au Pb (Figure III.29B). Les inclusions solides des poches sont plus riches en Cu que les IFs de LVS des minéralisations massives, des veines et des poches. Pour finir, la proportion entre le S, Ag et As montre que toutes les inclusions fluides et solides sont enrichies en S (Figure III.30C).

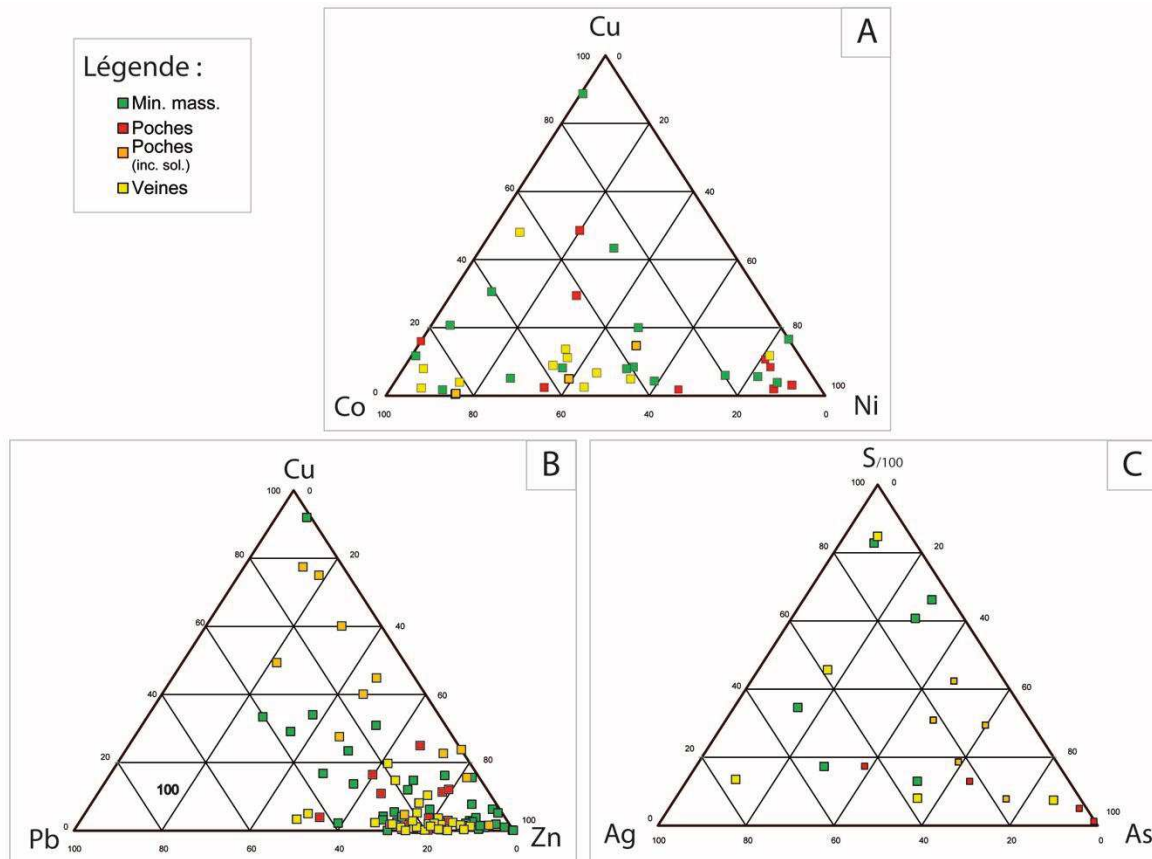


Figure III.29 : Diagramme ternaire dans les IFs de LVS et des inclusions solides des minéralisations massives, des poches et des veines (Données LA-ICP-MS)

#### Ce qu'il faut retenir :

**Microthermométrie.** Les inclusions fluides étudiées dans les minéralisations massives, les poches et les veines sont de trois types : les inclusions fluides triphasées composées d'une bulle de vapeur piégé dans un liquide et accompagnée d'un cube de halite (LVS) ; les inclusions fluides biphasées composées d'un liquide et d'une bulle de vapeur dominante (VL); des inclusions monophasées en phase vapeur (V) ; des inclusions solide de NaCl (S) parfois associées à des inclusions vapeurs. Certaines inclusions fluides de type LVS et VL des minéralisations massives montrent que du méthane est piégé au sein des bulles de vapeur. La présence de méthane indique des conditions réduites lors de la formation des IFs. Les températures minimales de piégeage du fluide ont pu être obtenues par microthermométrie. Les températures s'étalent de 140°C à 340 °C des minéralisations massives, aux poches jusqu'aux veines. Les inclusions fluides étudiées dans les minéralisations montrent des températures autour de 220°C, dans les veines autour de 170°C et dans les poches autour de 160°C. Les salinités et les pressions ont été calculées et montrent la même homogénéité des valeurs parmi les trois structures. Les teneurs en NaCl varient entre 17.86 et 41.19 %pds eq. Les teneurs en CaCl<sub>2</sub> varient de 3.7 et 21.2 %pds eq. des minéralisations massives, aux poches et aux veines. Les pressions varient entre 5 et 43 bars dans les trois structures.

**Analyse géochimique.** Le diagramme II.31 présente les éléments enrichis dans le fluide et synthétise l'évolution de tous les éléments en trace et métalliques en fonction des gangues minérales et des structures. Les fluides minéralisateurs dans les trois types de corps minéralisés sont enrichis en B, Li, Na, K, Cl, Sr, Co, Ni, S, Zn, Pb et As. Lors de la formation des structures extensives, un pic de concentrations en éléments trace et en métaux est systématiquement remarqué. De plus, une signature particulière du fluide est mise en évidence par les corrélations positives entre Na vs K, Li vs B, Cl vs Br, Ni vs Co, Co vs Fe et Zn vs Pb.

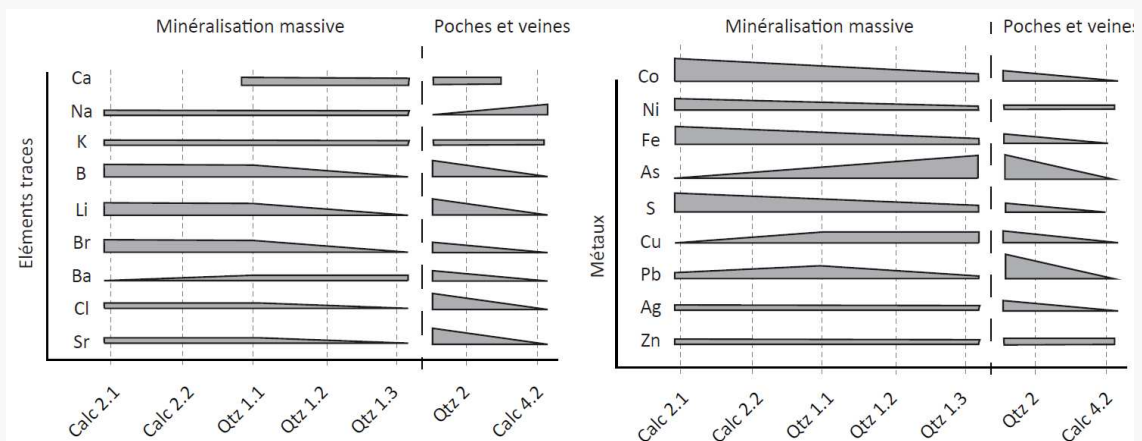


Figure III.30 : Récapitulatif du comportement des éléments en traces et des métaux dans les fluides des minéralisations massives, des veines et des poches

# **Chapitre IV : Géochimie in situ des minéralisations de Bou Azzer**



### A. Introduction

En complément de l'analyse géochimique des fluides réalisée dans le chapitre précédent, il apparaît nécessaire d'étudier également les concentrations en élément majeurs, traces, terres rares et métaux des différentes phases solides. Les analyses LA-ICP-MS in-situ ont été réalisées sur les arséniures, les sulfures, les carbonates et les spinelles des différentes générations de minéralisations compris dans la serpentinite, la diorite quartzique, les minéralisations massives, les veines et les poches. Ces analyses ont été faites afin d'apporter des éléments de réponses quant à la signature chimique et l'origine des différentes structures minéralisées. Le tableau paragenétique des différents stades à nickel (Ni), à cobalt (Co), à fer (Fe), et à sulfures, des gangues associées et des minéraux associés aux types de minéralisation de Bou Azzer est rappelé afin de resituer l'ordre d'apparition des minéraux de Bou Azzer (Figure IV.1). Les cases blanches représentent les arséniures et les minéraux analysés au LA-ICP-MS (Figure IV.1).

Minéralisations	Les minéralisations massives	Les veines et les poches	Stade d'altération
Nickeline	Nik1	Nik2	
Rammelsbergite	Ram		
Cobaltite	Cob1	Cob2	Cob3
Skuttérodite	Sk1 Sk2	Sk3	
Loellingite	Loel1	Loel2	
Safflorite	Saff1	Saff2	
Chlorite	Chl1	Chl2	
Gersdorphite	Gd		
Sphalérite	Sp1		Sp2
Galène	Gl		
Arsénopyrite	Asp1		Asp2
Chalcopyrite	Cp1		Cp2
TN-TD			TN-TD
Bornite			Bo
Erythrine			Ert
Titanite			Tit
<b>Minéraux de gangue</b>			
Reliques de spinelle	Sp1	Sp2	Sp3
Calcite	Calc1	2	3 4.1 4.2 5 6
Quartz	Qtz1	Qtz2	Qtz3
Dolomite		Dol1	
Adulaire			Adu
<b>Texture de la gangue</b>			
Remplissage			
Bréchique			
Rhomboédrale			
<b>Stade de minéralisation</b>	Arséniures de nickel	Arséniures de Cobalt et de Fer	Arséniures de Cobalt et de Fer Sulfure et métaux de base
			Stade d'altération

Figure IV.1: Tableau paragenétique simplifié des minéralisations et des minéraux de gangues



**Les arséniures de Ni et de Co** apparaissent sous deux habitus : i) disséminée au sein de la serpentinite et ii) massive au sein de la gangue des minéralisations massives, des veines et des poches.

**Les arséniures de Fe et les sulfures** ont uniquement été observés sous forme massive au sein des minéralisations massives, des poches et des veines. L'étude de ces phases minérales apporteront pour la première fois des informations géochimique de l'enrichissement en métaux (Zn, Pb, Bi, Au, Ag,...) des minéralisations à Co-Ni d'intérêt économique de Bou Azzer.

**Les carbonates** se trouvent être la phase minérale la plus représentative des différentes structures du gisement de Bou Azzer. Les calcites sont les principales hôtes des minéralisations du gisement de Bou Azzer et se trouvent systématiquement en lien avec les paragenèses des différents stades minéralisateurs du gisement de Bou Azzer. Les carbonates se forment à la fin du stade à Co et pendant le stade à Fe dans les différents types de minéralisations. Les dolomites montrent une mise en place antérieure à la formation des arséniures de Co dans les veines. Dans les serpentinites, la présence de carbonates est également systématique surtout aux abords des zones minéralisées.

**Les spinelles** apparaissent sous trois habitus dans les affleurements de notre étude. Les spinelles observés dans la serpentinite sont des reliques des minéraux mantelliques ayant résistées à sa serpentinisation. Les spinelles inclus dans la gangue des minéralisations massives ont été interprétés comme des fragments mantelliques mis en relation avec la présence de lentilles bréchiques liées à l'activité d'un contact faillé (voir chapitre II). Le troisième habitus, dans les poches, est certainement à mettre en relation avec l'existence de fragments bréchiques, comme pour le cas précédent. Les spinelles des trois habitus ont été analysés dans ce travail. Les spinelles visibles dans le tableau paragenétique ne sont pas néoformés dans les structures minéralisées de Bou Azzer mais

Pour la première fois, l'analyse au LA-ICP-MS des concentrations en éléments majeurs et traces est effectuée au sein de phases solides en lien avec les trois structures minéralisées de Bou Azzer. Ces analyses permettront de remonter et de comparer la signature des phases minérales à celle du fluide à l'origine de la formation des gisements de Bou Azzer. Le but est de comparer les gangues des minéralisations massives, des poches et des veines entre elles, mais également de caractériser un enrichissement préférentiel en certains éléments, de caractériser des signatures spécifiques et de faire le lien entre les spinelles mantelliques et ceux observés dans les structures des minéralisations massives et des poches.

## B. Méthodes analytiques

### 1. La microsonde électronique

Pour rappel, les échantillons de cette étude ont été collectés dans les galeries des sites miniers jusqu'à -510 m de profondeur afin de comprendre la relation entre les structures en surface et en profondeur. 165 lames minces polies (30 µm) ont été réalisées pour comprendre les caractéristiques pétro-structurales des différents types de minéralisation exploités dans le district de Co-Ni de Bou Azzer (Annexe II.1). La microanalyse a été réalisée à l'aide d'un microscope électronique à balayage FEI 100 FEI Quanta FEG 100 et d'une microanalyse à sonde électronique Cameca SX100 (EPMA) au Service interrégional Microsonde-Sud de Montpellier sur 12 lames minces des différents types de structures (Tableau IV.1 et IV.2).

**Tableau IV.1 : Tableau représentant les lames minces utilisées pour l'analyse des silicates, des carbonates et des spinelles**

	Zone	Serpentinite	Chromite	Spinelle	Albite
Lame mince	Diorite				BA8b
	Serpentinite	BAE46a	BAE46a		
	Min. massives		BAE63c1	BAE63c1	
	Poches				
	Veines				BAE3
	Carapace	BAE50a	BAE50a	BAE50a	

	Zone	Feldspath K	Mica	Chlorite	Calcite	Quartz
Lame mince	Diorite	BA8b	BA8b	BA8b		
	Serpentinite			BAE46a		
	Min. massives			BAE63c1	BAE63c1	
	Poches				BAE59a1	BAE59a1
	Veines				BAE3	BAE3
	Carapace				BAE50a	BAE50a

**Tableau IV.2 : Tableau représentant les lames minces utilisées pour l'analyse des minéraux d'intérêt économiques**

	Zone	Nickeline	Rammelsbergite	Cobaltite	Skuttérodite
Lame mince	Diorite				
	Serpentinite	BAE46a	BAE46a	BAE46a	BAE46a
	Min. massives	BAE21a	BAE21a	BAE21a	BAE21a
	Min. massives	BAE21b	BAE21b		BAE21b
	Min. massives				BAE27b
	Poches			BAE59a1	
	Veines				
	Veines				BAE20b
	Veines			BAE51b	

Suite - Tableau IV.2 : Tableau représentant les lames minces utilisées pour l'analyse des minéraux d'intérêt économiques

	Zone	Safflorite	Loellingite	Arsénopyrite	Gersdorffite
Lame mince	Diorite		BAE8b		
	Serpentinite			BAE46a	BAE46a
	Min. massives		BAE21a		
	Min. massives	BAE27b	BAE27b		
	Min. massives		BAE21b		
	Poches	BAE59a1	BAE59a1		
	Veines		BAE3	BAE3	
	Veines		BAE20b	BAE20b	
	Veines	BAE51b	BAE51b		
	Zone		BAE53		

Les éléments majeurs et mineurs ont été mesurés dans les phases solides, les arséniures et les sulfures avec un même courant de faisceau de 10nA et une tension d'accélération de 20 keV. Quinze éléments ont été analysés pour les phases solides (élément, ligne spectrale et spectromètre) : Al (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K $\alpha$ , TAP), Si (SiO<sub>2</sub>, K $\alpha$ , TAP), Cl (Cl, K $\alpha$ , PET), Ti (TiO<sub>2</sub>, K $\alpha$ , PET), Na (Na<sub>2</sub>O, K $\alpha$ , TAP), Mg (MgO, K $\alpha$ , TAP), Mn (MnO, K $\alpha$ , LLIF), Fe (FeO, K $\alpha$ , LLIF), S (SO<sub>2</sub>, K $\alpha$ , LPET), K (K<sub>2</sub>O, K $\alpha$ , LPET), Ca (CaO, K $\alpha$ , LPET), Cr (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K $\alpha$ , PET), Co (CoO, K $\alpha$ , LLIF), Ni (NiO, K $\alpha$ , LLIF), As (As<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, L $\alpha$ , TAP). Neuf éléments ont été analysés pour les arséniures et les sulfures (élément, ligne spectrale et spectromètre) : (Co (Co, K $\alpha$ , LLIF), Ni (Ni, K $\alpha$ , LLIF), Fe (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K $\alpha$ , LLIF), Cu (Cu, K $\alpha$ , LLIF), Zn (Zn, K $\alpha$ , LLIF), Pb (PbTe, M $\alpha$ , LPET), Ag (Ag, L $\alpha$ , LPET), Au (Au, M $\alpha$ , TAP), As (GaAs, K $\alpha$ , LLIF) . Les temps de comptage pour les analyses varient de 60 à 240 s. Les données de la microsonde électronique obtenues sont représentées dans l'annexe II.2 et ont servi de standard interne aux arséniures et aux sulfures analysés au LA-ICP-MS.

## 2. L'analyse LA-ICP-MS sur minéraux

Les analyses des minéraux au LA-ICP-MS ont été effectuées à l'ETH de Zurich en utilisant un laser excimer ArF (193 nm) (Figure IV.2). Les arséniures, les sulfures, les spinelles et les carbonates ont été analysés avec un faisceau de taille entre 29 et 51  $\mu\text{m}$  de diamètre à une fréquence de 25 Hz. Les données ont été récoltées dans un spectromètre de masse ICP quadripolaire Elan6100 DRC. Une densité d'énergie de 12 J.cm<sup>-2</sup> a été utilisée avec un taux de répétition laser de 26 kV pour l'analyse des arséniures, des carbonates et des silicates. Le bruit de fond a été mesuré systématiquement durant 30 secondes avant le début de chaque analyse allant jusqu'à 40 secondes d'ablation (Figure IV.3). Les tableaux IV.3 et IV.4 présentent les 9 échantillons utilisés à l'analyse LA-ICP-MS des minéraux d'intérêt économique et les 10 échantillons utilisés à l'analyse des calcites, spinelles et de la serpentine.

Tableau IV.3 : Tableau représentant les lames minces utilisées pour l'analyse des arséniures

		Nickeline	Rammelsbergite	Cobaltite	Skuttérodite	Loellingite
Lame mince	Serpentinite	<b>BAE46a</b>	<b>BAE46a</b>	<b>BAE46a</b>	<b>BAE46a</b>	
	Min. massives	<b>BAE21b</b>	<b>BAE59d</b>	<b>BAE21a</b>	<b>BAE59d</b>	
	Min. massives	<b>BAE71c3</b>	<b>BAE71c3</b>		<b>BAE21b</b>	
	Poches			<b>BAE59a1</b>		<b>BAE59a1</b>
	Veines				<b>BAE23</b>	<b>BAE23</b>
	Veines			<b>BAE51c</b>	<b>BAE51c</b>	
	Veines					

		Sphalérite	Arsénopyrite	Chalcopyrite
Lame mince	Serpentinite			
	Min. massives	<b>BAE21a</b>		<b>BAE59d</b>
	Min. massives			<b>BAE21b</b>
	Poches			
	Veines		<b>BAE23</b>	
	Veines			
	Veines	<b>BAE59d</b>		

Tableau IV.4 : Tableau représentant les lames minces utilisées pour l'analyse des silicates, des carbonates et des spinelles

		Serpentine	Chromite	Spinelle	Calcite
Lame mince	Serpentinite	<b>BA14</b>		<b>BA14</b>	
	Serpentinite	<b>BAE46a</b>	<b>BAE46a</b>	<b>BAE46a</b>	
	Min. massives				<b>BAE21b</b>
	Min. massives			<b>BAE63c1</b>	<b>BAE63c1</b>
	Min. massives		<b>BAE71c3</b>	<b>BAE71c3</b>	<b>BAE71c3</b>
	Poches				<b>BAE59a1</b>
	Poches				<b>BAE68e</b>
	Poches				<b>BAE68f2</b>
	Veines				<b>BAE23</b>
	Veines				<b>BAE51c</b>

A partir de 32 secondes d'analyse d'une skuttérodite, par exemple, la présence d'éléments, appelés métaux dans ce manuscrit, comme : As, Co, Ni, Bi, Fe, Sb, In, Pb, Cu, Ge et Au est détectable. Ainsi, les isotopes suivants qui ont pu être analysés dans les arséniures, les carbonates et les spinelles au LA-ICP-MS seront appelés éléments en traces dans ce manuscrit :  $^7\text{Li}$ ,  $^{11}\text{B}$ ,  $^{23}\text{Na}$ ,  $^{25}\text{Mg}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{29}\text{Si}$ ,  $^{31}\text{P}$ ,  $^{35}\text{Cl}$ ,  $^{39}\text{K}$ ,  $^{43}\text{Ca}$ ,  $^{45}\text{Sc}$ ,  $^{55}\text{Mn}$ ,  $^{79}\text{Br}$ ,  $^{85}\text{Rb}$ ,  $^{88}\text{Sr}$ ,  $^{89}\text{Y}$ ,  $^{90}\text{Zr}$ ,  $^{93}\text{Nb}$ ,  $^{95}\text{Mo}$ ,  $^{111}\text{Cd}$ ,  $^{133}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Ba}$ ,  $^{178}\text{Hf}$ ,  $^{181}\text{Ta}$ ,  $^{202}\text{Hg}$ ,  $^{205}\text{Tl}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{238}\text{U}$ ; les métaux :  $^{34}\text{S}$ ,  $^{49}\text{Ti}$ ,  $^{51}\text{V}$ ,  $^{53}\text{Cr}$ ,  $^{57}\text{Fe}$ ,  $^{59}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Ni}$ ,  $^{63}\text{Cu}$ ,  $^{66}\text{Zn}$ ,  $^{71}\text{Ga}$ ,  $^{74}\text{Ge}$ ,  $^{75}\text{As}$ ,  $^{77}\text{Sn}$ ,  $^{107}\text{Ag}$ ,  $^{121}\text{Sb}$ ,  $^{125}\text{Te}$ ,  $^{182}\text{W}$ ,  $^{197}\text{Au}$ ,  $^{209}\text{Bi}$  et  $^{208}\text{Pb}$ ; ainsi que les terres rares dans les carbonates :

La<sup>139</sup>, Ce<sup>140</sup>, Pr<sup>141</sup>, Nd<sup>146</sup>, Sm<sup>147</sup>, Eu<sup>151</sup>, Gd<sup>157</sup>, Tb<sup>158</sup>, Dy<sup>163</sup>, Ho<sup>165</sup>, Er<sup>167</sup>, Tm<sup>169</sup>, Yb<sup>173</sup>, Lu<sup>175</sup>. Le groupe des terres rares rassemble, dans cette étude, 14 éléments présents en traces dans la plupart des environnements naturels. L'analyse des terres rares faite dans les carbonates a été établie en se basant sur l'étude pétro-structurale et texturale des minéraux du gisement. Les terres rares ont été normalisées aux chondrites suivant McDonough & Sun (1995). Pour l'étalonnage des phases solides, le verre synthétique multiéléments NIST 612 (Pearce et al., 1997) a été analysé avec un faisceau de 40 microns d'une fréquence de 10 Hz et il a été utilisé comme standard de l'analyse des carbonates et des silicates. Les verres synthétiques multiéléments NIST 610 et MASS 1 ont été analysés pour l'étalonnage des arséniures et des sulfures (respectivement, Pearce et al., 1997 ; Wilson et al., 2012). Les standards internes utilisés pour l'analyse des arséniures et les sulfures sont leurs éléments majeurs respectifs : le Ni pour la nickeline (43.3384 %poids en Ni) et la rammelsbergite (22.0798 % poids en Ni), le Co pour la skuttérodite (18.8884 %poids en Co) et la cobaltite (32.7798 %poids en Co), le Fe pour la loellingite (25.4701 %poids en Fe) et l'arsénopyrite (35.3957 %poids en Fe), le Cu pour la chalcoppyrite (34.38 %poids en Cu) et le Zn pour la sphalérite (64.9528 %poids en Zn), le Fe pour les spinelles (20.1910 % FeO) et le Ca pour les calcites (40.8853 % pds en Ca dans les minéralisations massives, 38.2597 % pds dans les poches et 39.9767 %pds dans les veines). Ces valeurs ont été récupérées des analyses faites à la microsonde électronique sur les arséniures et les sulfures (Annexe II.2). Ces standards internes ont été choisis en fonction des analyses microsonde effectuées en amont. Les annexes présentent la composition des éléments analysés dans les minéralisations d'intérêt économique (Annexes IV.1 et IV.2), les carbonates (Annexe IV.3) et les spinelles (Annexe IV.4).

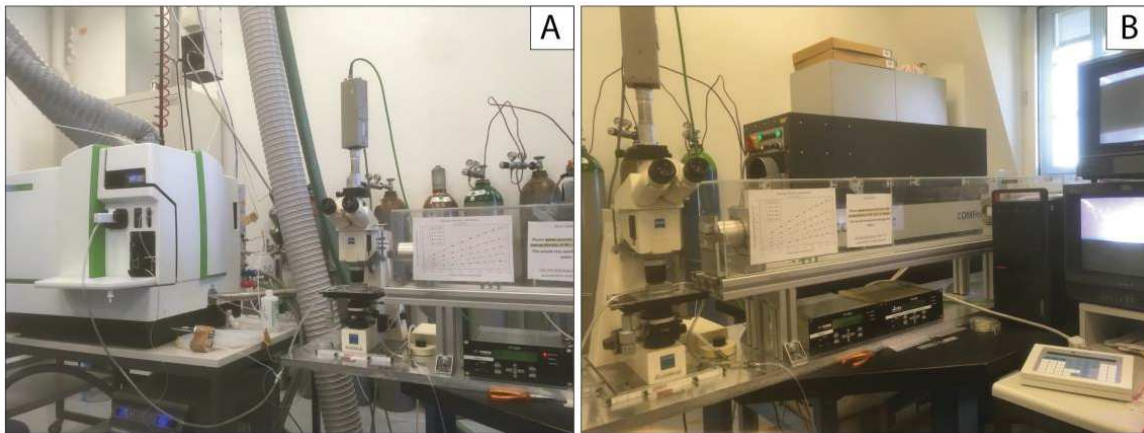


Figure IV.2: LA-ICP-MS de l'ETH de Zurich. A) ICP-MS. B) Système laser

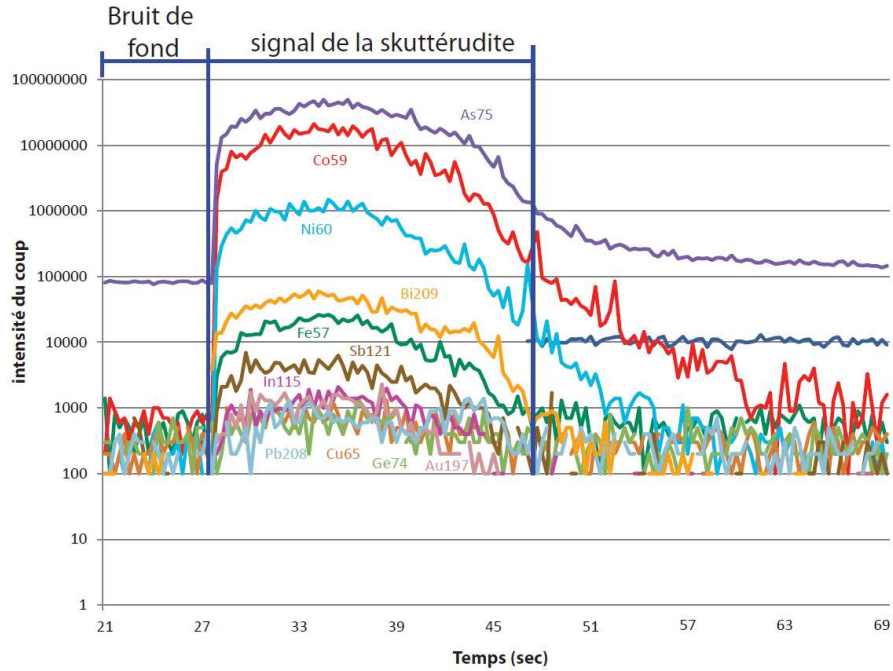


Figure IV.3: Signal d'ablation au laser en fonction du temps - exemple d'une skuttérodite

Lors de chaque session analytique, les standards ont permis de contrôler la précision et la dérive instrumentale, ainsi que la stratégie d'étalonnage. Les données et le calcul des concentrations au LA-ICP-MS en éléments dans les arséniures, les carbonates et les silicates ont été traités avec le logiciel SILLS (Signal Integration for Laboratory Laser Systems), utilisant la plateforme MATLAB (The MathWorks, Inc.) pour l'obtention de données quantitatives des minéraux (Guilong et al., 2008). Les concentrations obtenues au LA-ICP-MS en éléments majeurs des arséniures analysés ne sont pas utilisables et sont sur estimées, comme le montre l'annexe IV.1. En prenant l'exemple de la rammelsbergite –  $NiAs_2$ , les valeurs obtenues en As et en Ni (éléments majeurs) sont surévaluées après le traitement SILLS. Ces concentrations obtenues ne sont pas représentatives des valeurs réelles. Seules les concentrations obtenues par microsonde seront utilisées. Les concentrations en indium ne seront également pas exploitables en raison d'une interférence de masse importante entre l'As et l'In lors des analyses de tous les minéraux. La Figure IV.5 montre cette nette corrélation entre ces deux éléments, notamment dans la skuttérodite et les spinelles, marquant l'interférence entre les deux éléments.

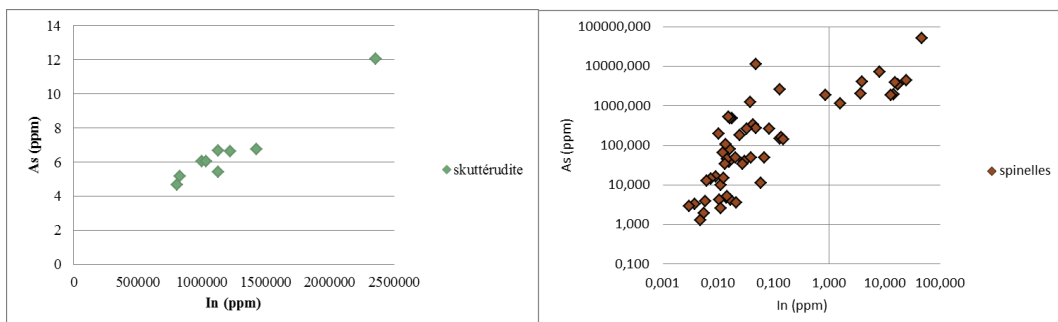
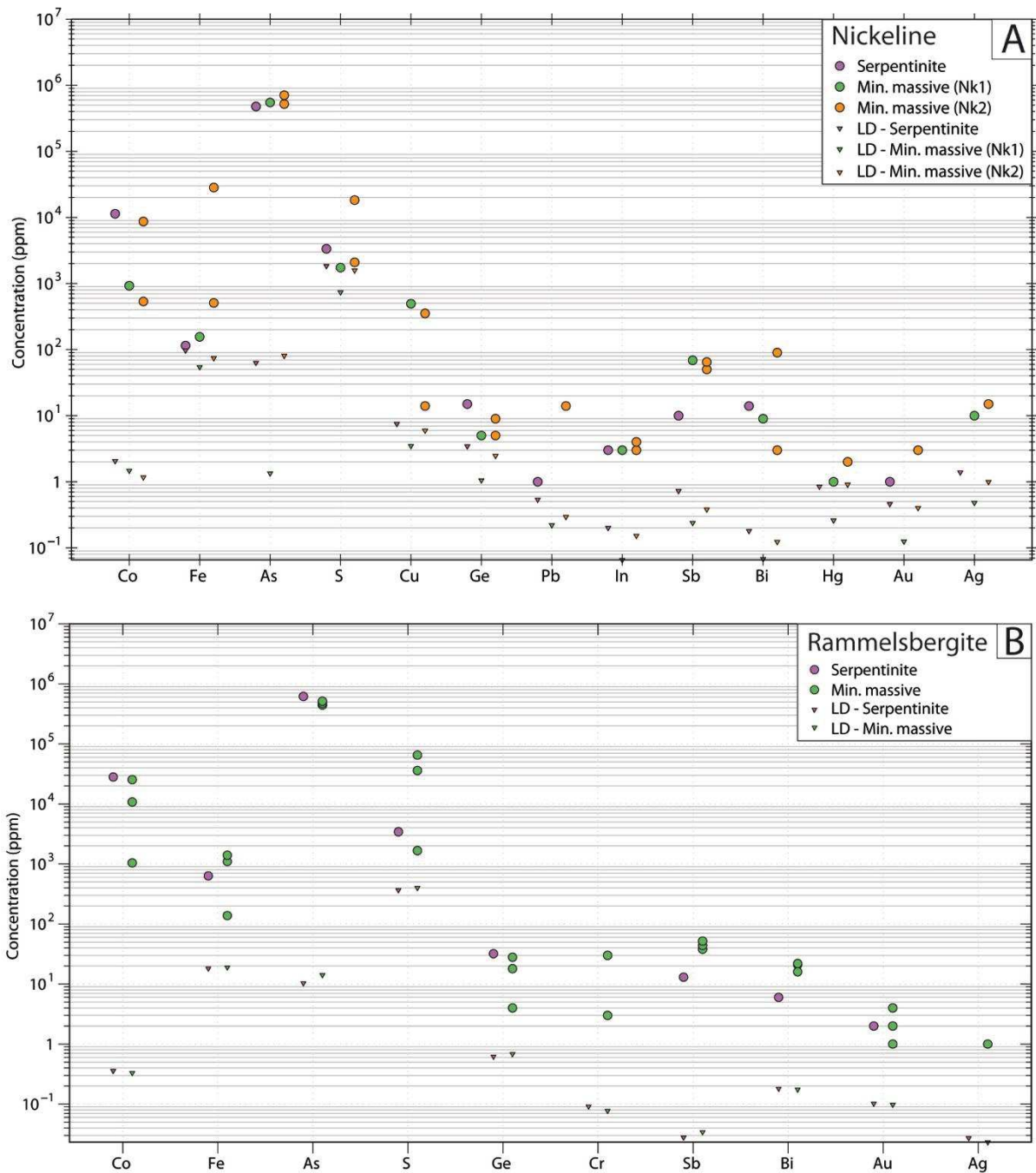


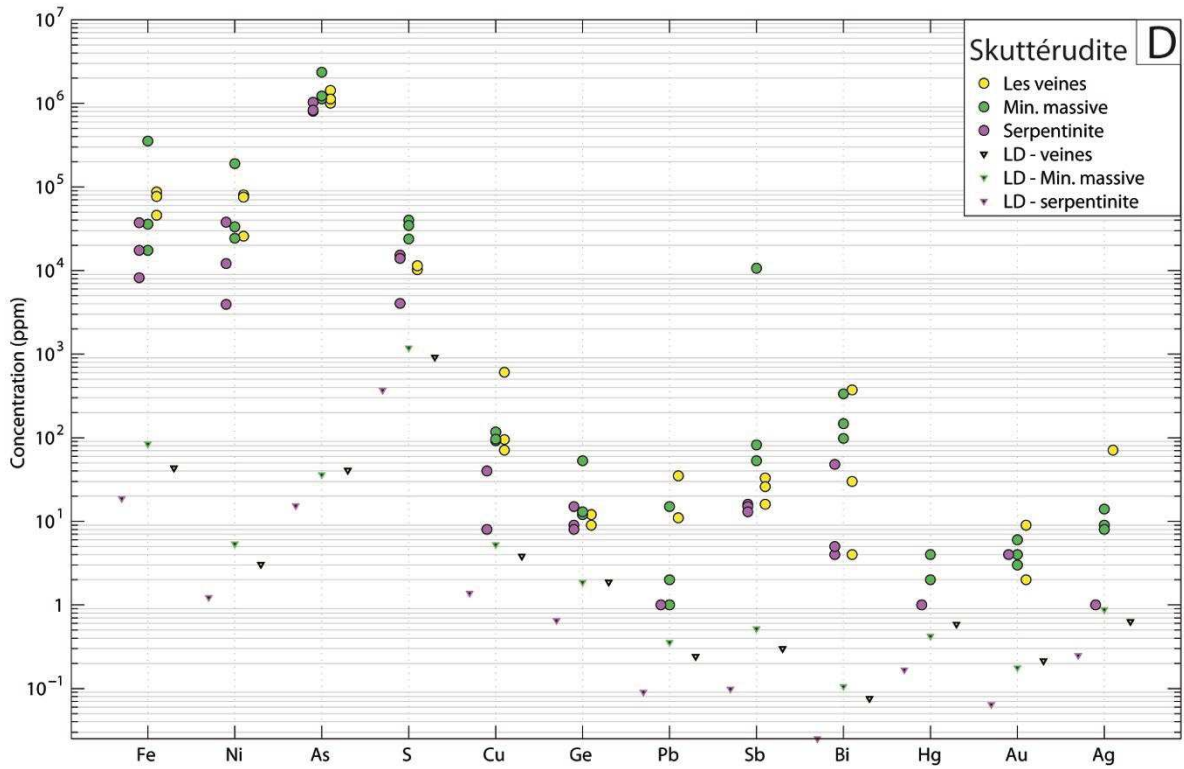
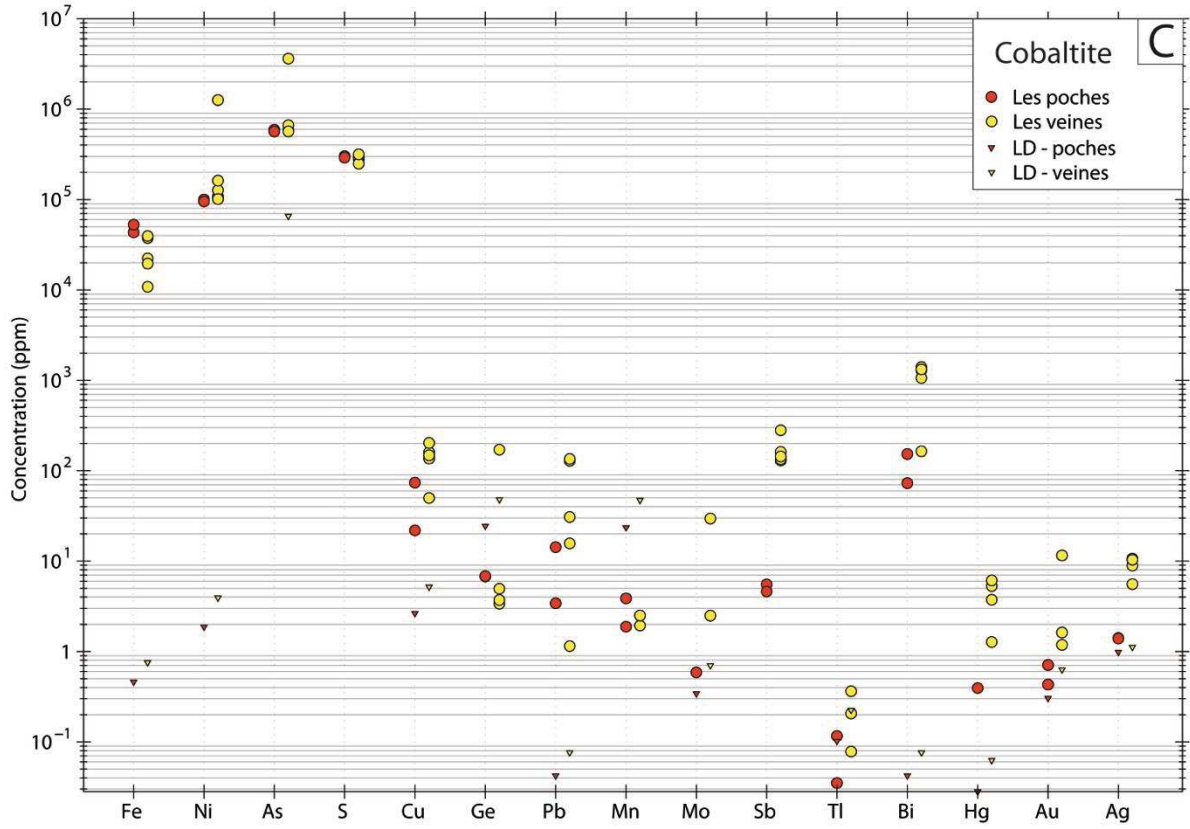
Figure IV.4 : Diagrammes de corrélation entre l'As et l'indium (données LA-ICP-MS)

## C. Résultats de l'étude géochimique in-situ des arséniures et des sulfures de Bou Azzer

### 1. Les arséniures

L'analyse des métaux en traces dans les arséniures (Figure IV.5 : A) nickeline - NiAs, B) rammelsbergite – NiAs<sub>2</sub>, C) Cobaltite - CoAsS, D) skuttérodite – (Co,Ni)As<sub>3</sub> et E) loellingite – FeAs<sub>2</sub>) est présentée en prenant en compte des différents contextes et structures du gisement : la serpentinite encaissante, les minéralisations massives, les veines et les poches.







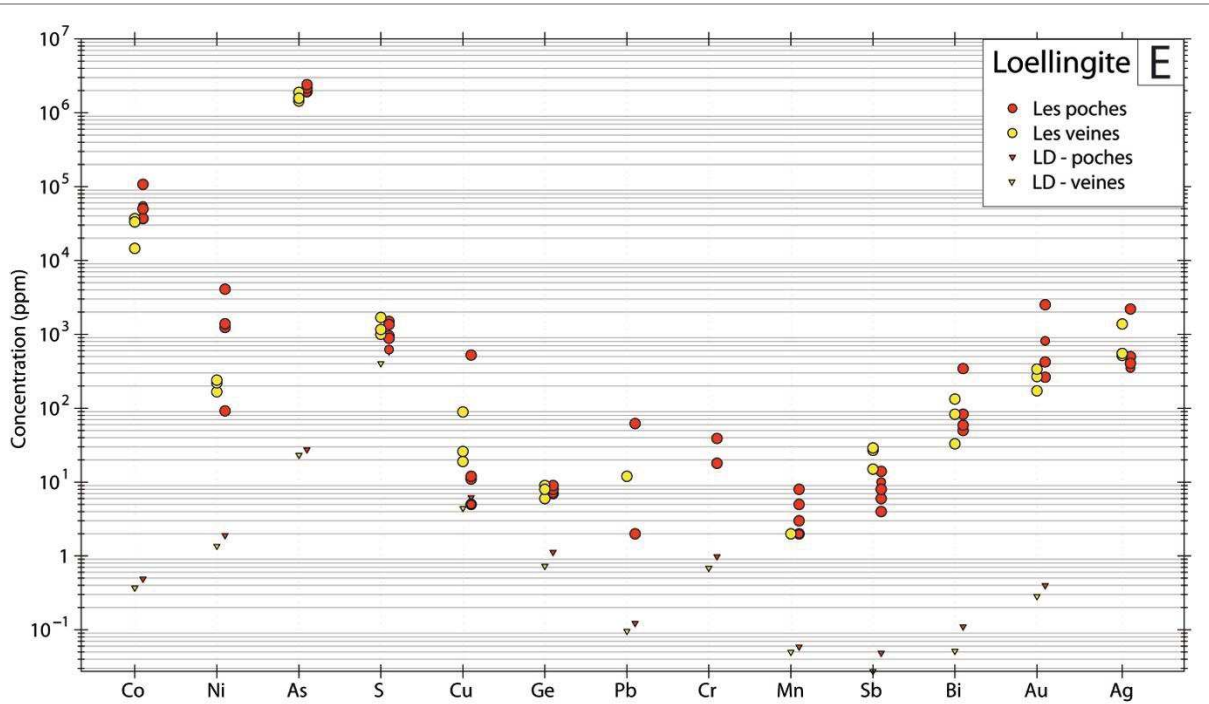


Figure IV.5 : Diagrammes des concentrations des métaux en trace dans A) la nickeline, B) la rammelsbergite, C) la cobaltite, D) la skuttérudite et E) la loellingite. LD : limites de détection associées aux éléments (en ppm) - triangles renversés) (Données LA-ICP-MS)

*La nickeline* apparaît sous trois formes : i) disséminée dans la serpentinite, ii) en lamelles (Nik1) au sein de la gangue carbonatée encaissant la minéralisation et iii) comme minéral d'altération autour de fractures de rammelsbergite et de skuttérudite (Nik2) (Figures IV.4 et IV.5A). La Figure IV.5A synthétise les concentrations en métaux des nickelines. La présence en éléments trace de Cu (14 à 350 ppm), Ge (5 à 15 ppm), Sb (10 à 65 ppm), Bi (2 à 90 ppm) et Ag (0.01-0.015 ppm) est observée (Annexe IV.1A). Globalement, les nickelines issues de ces trois environnements montrent des compositions similaires (Figure IV.5A)

*La rammelsbergite* (Ram) apparaît soit sous forme disséminée dans la serpentinite ou alors en fragments isolés et fracturés au cœur de la gangue carbonatée. La rammelsbergite analysée dans la serpentinite montre un enrichissement en Co (2.8 %pds en Co) et Ge (32 ppm) comparé aux rammelsbergites de la gangue carbonatée (0.1-2.5 %pds en Co et 4-28 ppm de Ge). Cependant, les rammelsbergites comprises dans la gangue sont enrichies, par rapport au rammelsbergite comprises dans la serpentinite, en Bi (16-22 ppm contre 6 ppm), en Sb (38-52 ppm), S (3 à 6 %pds), en Fe (0.1 %pds) et en Au (0.001 à 0.004 ppm) (Figure IV.5B et Annexe IV.1B).

*La cobaltite*, minéral présent à plusieurs stades de la paragenèse, la cobaltite analysée provient essentiellement des poches et des veines minéralisées (Cob3). Ce sulfo-arséniure de Co compris au sein des veines est enrichi en Cu (jusqu'à 200 ppm), Pb (15 à 129 ppm), Bi (environ 1000 ppm), Sb (entre 129-280 ppm), Au (0.4 – 1.1 ppm), Ag (entre 5 et 011 ppm) et Hg (1.3 à 6 ppm) par rapport aux

cobaltites au sein des poches. La cobaltite composant les poches montre systématiquement des concentrations inférieures aux cobaltites analysées dans les veines, sauf en Fe et en Mn (Figure IV.5C et Annexe IV.1C).

*La skuttérodite* est également très présente tout le long de l'histoire paragenétique des gisements de Bou Azzer. La skuttérodite représente le minéral majoritairement exploité pour le Co à Bou Azzer. Les analyses au LA-ICP-MS ont permis d'obtenir les données des métaux en traces des différentes générations de skuttérodite (Annexe IV.1D). Les concentrations en Ni et S augmentent des skuttérodites provenant de la serpentinite (Skut1) (jusqu'à 0,13 % pds de Ni et 0.4-1.2 % pds de S) et celles comprises dans la gangue carbonatée (Skut2) (jusqu'à 0,19 % pds de Ni et 2.3-3.9 % pds de S) (Figure IV.6A et B et Annexe IV.1D). Les skuttérodites analysées dans les veines (Skut3) montrent des concentrations intermédiaires en S (1 %pds), une augmentation en Ag passant de 1 ppm à 71 ppm (Figure IV.6C) et en Fe de 0.8 à 3.7 % dans Skut1 à 8 % pds dans Skut3 (Figure IV.6E). Les concentrations de Ge augmentent de 8 à 12 ppm et en Cu de 8 à 607 ppm des Skut1 dans la serpentinite vers 607 ppm de Skut1 à Skut3 (Figure IV.5D et Annexe IV.1D). La Skut1 a des concentrations en métaux en trace moins élevées que les Skut 2 et 3 (Figure IV.5D).

*La loellingite* analysée au LA-ICP-MS est celle des veines et des poches. Elle apparaît sous deux formes distinctes : i) formée en surcroissance sur les skuttérodites et les safflorites dans les veines et ii) disséminée dans les carbonates qui forment l'ensemble des poches. Les loellingites de ces deux structures montrent des concentrations similaires en métaux (Figure IV.5E) avec 0.1 %pds de S en moyenne, entre 33 et 340 ppm de Bi, entre 12 et 524 ppm de Cu, entre 6 et 29 ppm Sb, entre 6 et 9 ppm de Ge et jusqu'à 0.3 d'Ag et 2.2 ppm d'Au (Annexe IV.1E).

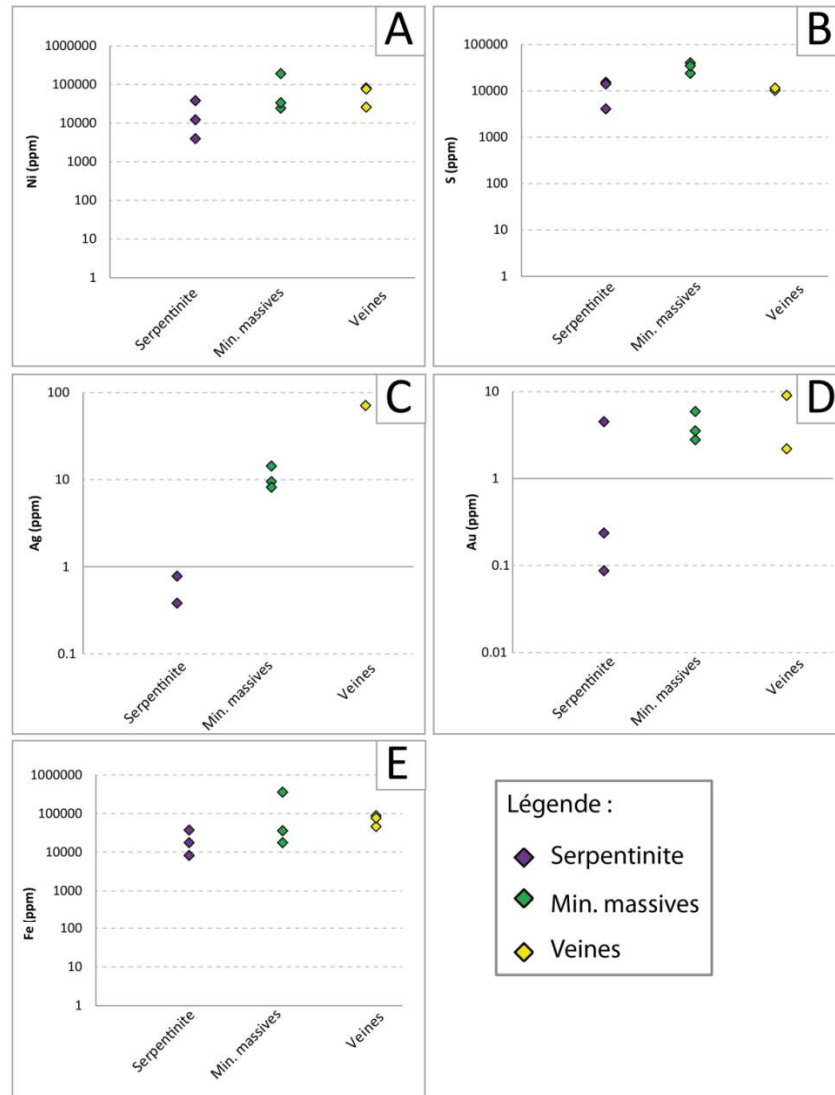


Figure IV.6 : Diagrammes des concentrations en métaux des skuttérudites en fonction de la chronologie d'apparition des structures (Données LA-ICP-MS)

## 2. Les sulfures

*Les arsénopyrites* analysées appartiennent à la paragenèse la plus tardive des veines : le stade à sulfures (Figure IV.4). Quelques traces (< 10 ppm) de Ge, Sb et Cu ont été détectées (Annexe IV.2A).

*La sphalérite* et *la chalcopyrite* analysées proviennent du stade tardif à sulfure associé à la gangue carbonatée (calc 2) des minéralisations massives. La sphalérite (sp1) est enrichie en Cu (de 215 à 2138 ppm), Ge (de 5 jusqu'à 600 ppm), As (20 à 250 ppm) et Ag (de 3 à 155 ppm). La chalcopyrite montre également des teneurs élevées en Zn (de 6 à 56 ppm), Ge (de 2 à 5 ppm), As (160 à 279 ppm) et Ag (45 ppm en moyenne) (Annexe IV. 2B et C).

## D. Analyse géochimique des carbonates et des spinelles

### 1. La gangue carbonatée

**Les éléments majeurs (Ca, Mg, Fe, Mn).** Les calcites ont été classées en fonction de la chronologie des structures encaissantes. Les concentrations en Ca ont été divisées par 1000 afin d'obtenir une meilleure visibilité. Le rapport entre Mn, Mg et Fe est obtenu par le #Mn ( $\#Mn / [Mn + Fe + Mg]$ ). Les carbonates tardifs associés aux poches montrent des concentrations plus élevées en Mn ( $\#Mn = 0.9$ ) comparé aux calcites des minéralisations massives ( $\#Mn = 0.6$ ) et des veines ( $\#Mn = 0.4$ ); tandis que, les calcites des minéralisations massives et des veines indiquent des concentrations plus élevées en Ca et Fe par rapport aux calcites des poches (Figure IV.7 et Annexe IV.3). Le résultat majeur apparaît dans l'enrichissement en Mn des calcites des poches par rapport aux minéralisations massives et des veines.

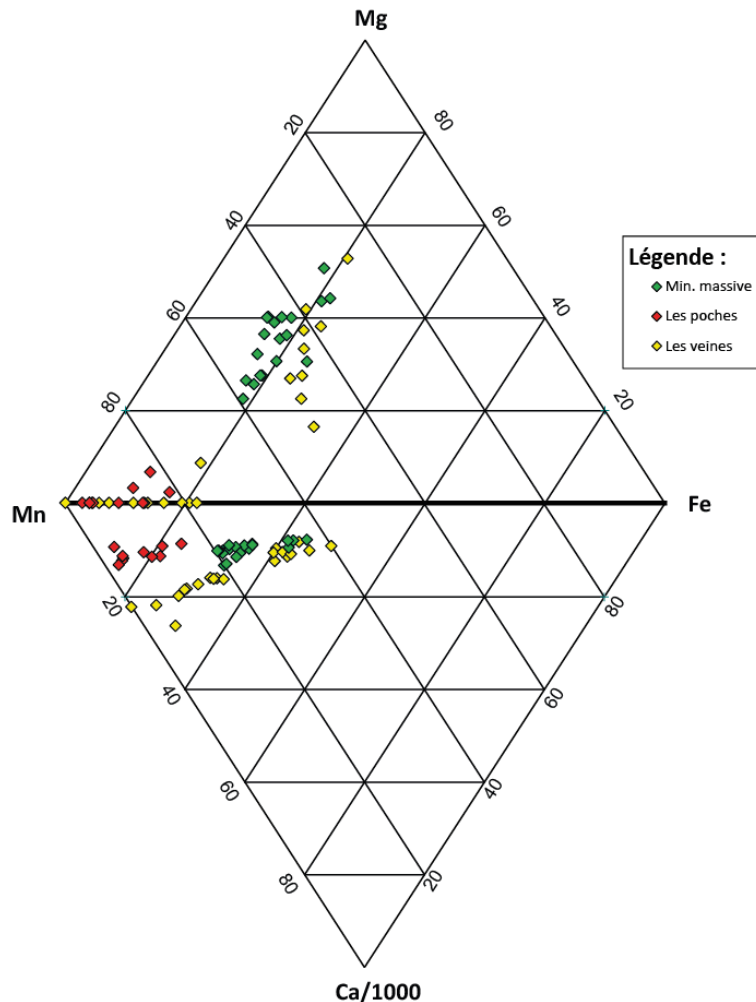
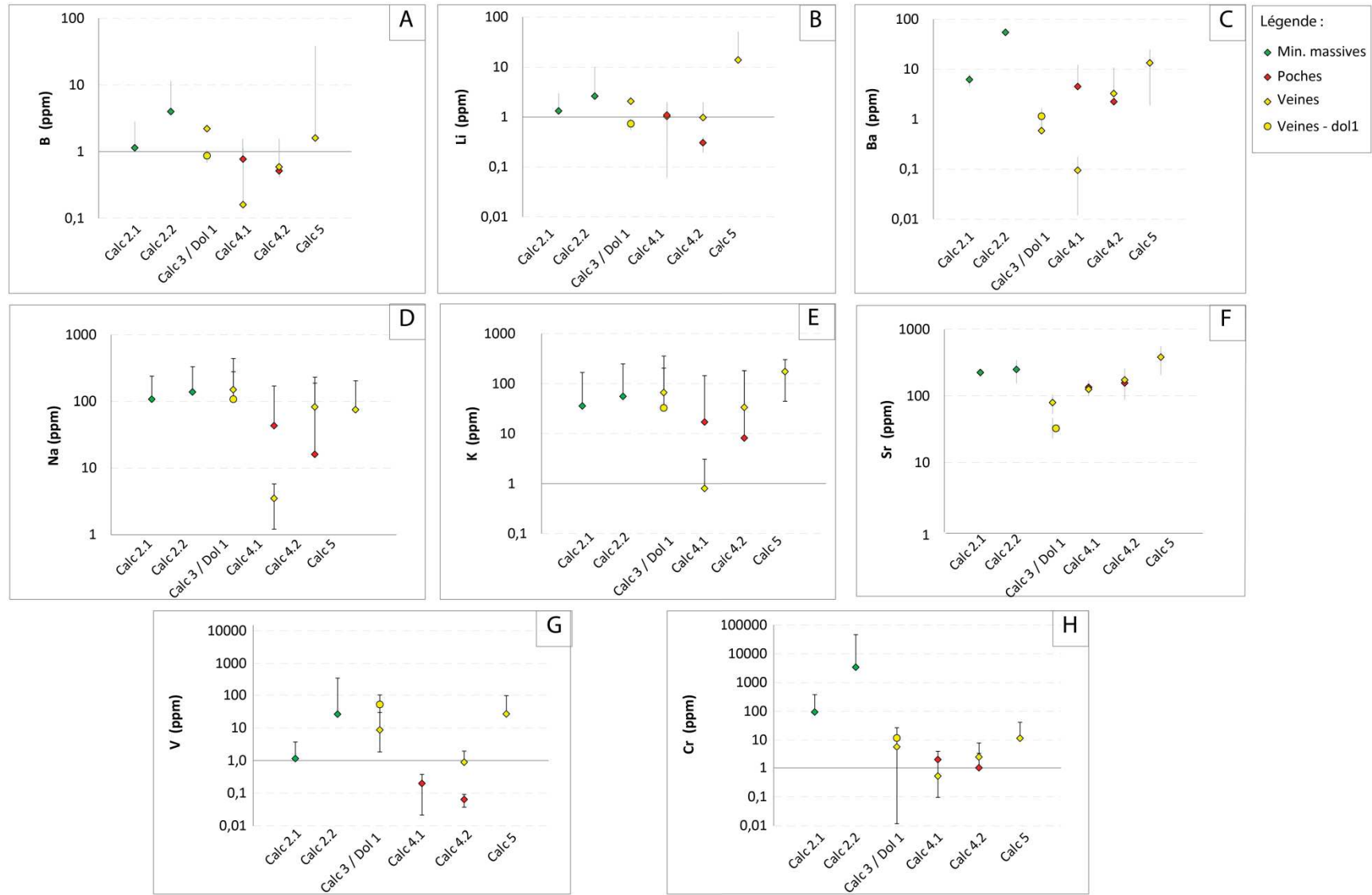


Figure IV.7: Diagramme quaternaire entre le Mg, le Mn, le Fe et le Ca (Ca/1000) dans les carbonates en fonction des différentes structures étudiées (Données LA-ICP-MS)

**Concentrations des éléments traces (B, Li, Ba, Na, K, V, Cr, Co, Ni, Fe, Ag, Zn, Cu, terres rares).** Les résultats de l'analyse pondérale des métaux dans les calcites sont les suivants :

- Les concentrations en B, Li, Ba Na et K sont stables depuis les calcites des minéralisations massives vers ceux des veines et des poches (Figure IV.8A à E). Cependant, les calcites (Calc 4.2) des veines montrent des teneurs moyennes en Na et K très faibles (inférieures à 4 ppm). Les calcites (Calc 5) tardives indiquent de fortes teneurs en Li atteignant 13 ppm en moyenne ; tandis que le B ne dépasse pas 4 ppm. Le Sr décrit une augmentation des teneurs stables dans les calcites des minéralisations massives (250 ppm environ); à partir de la mise en place des structures extensives, les teneurs augmentent jusqu'à 469 ppm en moyenne (Figure IV.8F). Le V et Cr décrivent des tendances variables dans le temps des minéralisations massives aux structures extensives (Figure IV.8G, H). Les concentrations moyennes en V sont inférieures à 1 ppm dans les poches et inférieures à 10 ppm, en Cr dans les veines et les poches.
- Les concentrations en Co varient entre 0.1 et 10 ppm et ce, pour l'ensemble des habitus. Une tendance progressive est difficilement observable (Figure IV.8I). La concentration moyenne en Ni est de 46 ppm dans les calcites associées aux minéralisations massives, et chute jusqu'à 2 et 5 ppm dans les poches et les veines. Une légère augmentation de ces teneurs (jusqu'à 14 ppm) est détectée pour la dernière génération de calcites formée dans les structures extensives (Figure IV.8J). Les teneurs moyennes en Fe augmentent dans les minéralisations massives jusqu'à de 4800 ppm. Lors de l'arrivée des structures extensives, la concentration en Fe diminue subitement dans les calcites des poches et des veines à 367 ppm en Fe (Figure IV.8K). Le Zn montre le même comportement que le Fe. Une augmentation de 8 ppm jusqu'à environ 290 ppm apparaît dans les minéralisations massives alors que les teneurs moyennes chutent à 1 ppm dans les poches et les veines. Les concentrations en Zn présentent ensuite une nouvelle augmentation jusqu'à 17 ppm (Figure IV.8L). Les teneurs en Cu décrivent une diminution dans le temps de 13 à 0.9 ppm en moyenne (Figure IV.8M). Le Pb montre des teneurs hétérogènes et très faibles dans les calcites, variant entre 25 et 864 ppb. (Figure IV.8N). Les teneurs en Ag augmentent de 16 ppb à 65 ppb dans les minéralisations massives. Les concentrations dans les veines sont également hétérogènes et varient entre 11 et 47 ppb en moyenne (Figure IV.8O).
- La somme des terres rares (TR - du La au Lu) a également été comparée dans les différentes générations de calcites (Figure IV.8P). Leur distribution montre le même comportement que le Fe. Les teneurs moyennes augmentent jusqu'à 243 ppm pour chuter à 100 ppm en moyenne. Cependant, les poches montrent une nette différence avec les autres calcites. Le total des concentrations en TR ne dépasse pas 17 ppm (Figure IV.8P).



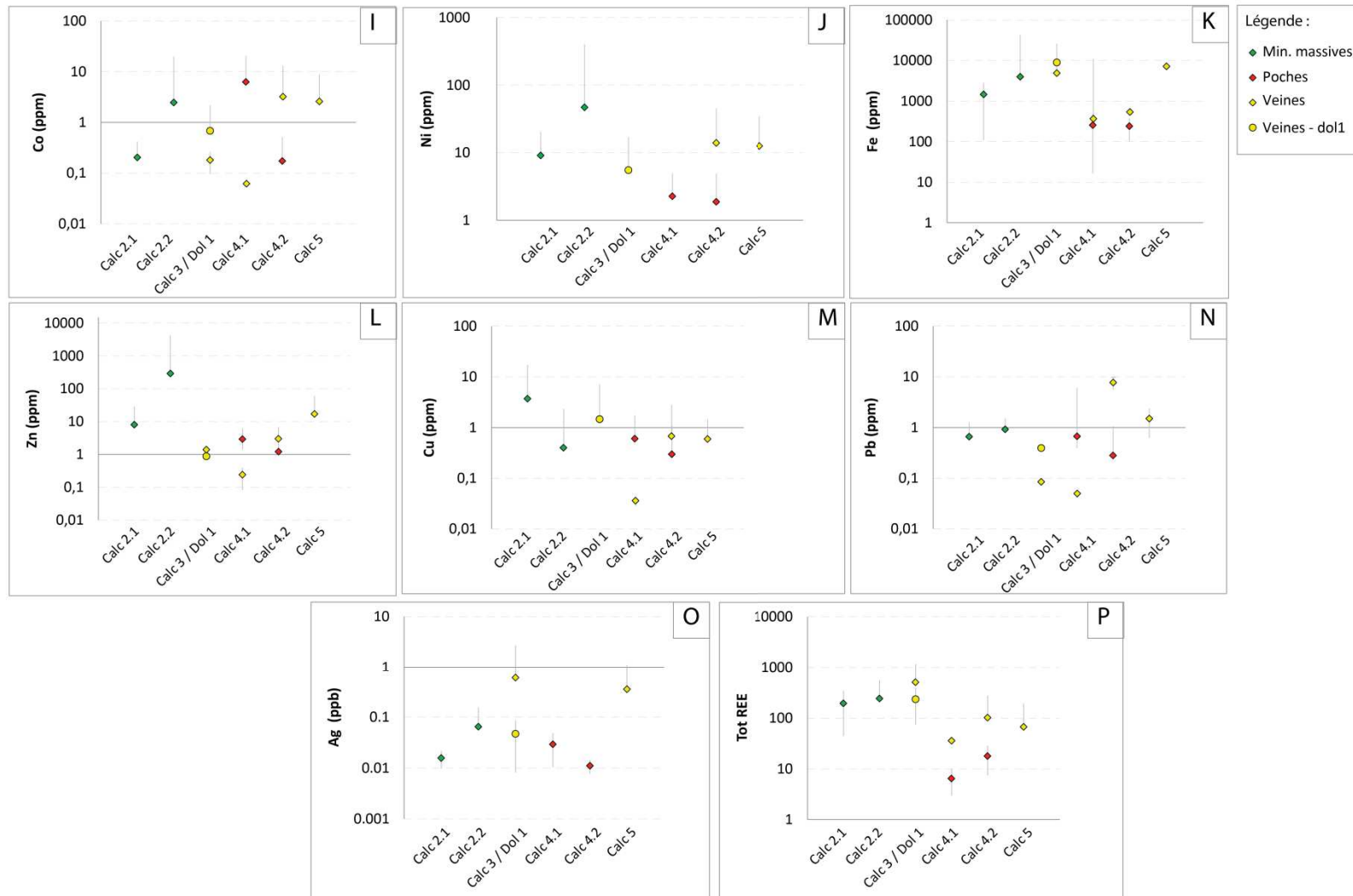


Figure IV.8: Diagrammes élémentaires des concentrations en métaux dans les calcites de Bou Azzer représentées en fonction de leur chronologie d'apparition (Données LA-ICP-MS)

La relation entre Sr vs Mg et Sr vs Mn, Na vs K et Li vs B est visible par des corrélations positives nettes dans la Figure IV.9. L'intérêt d'étudier la relation entre le V et le Cr et d'autres métaux dans les calcites de Bou Azzer est lié à la relation étroite entre ces deux éléments et le manteau terrestre. Leur enrichissement est remarqué (Canil, 2002). La relation entre les métaux et le V montre des corrélations positives dans toutes les calcites (Figure IV.10A à D). Cependant, les corrélations sont plus marquées dans les calcites associées aux veines. La relation entre Co vs Cr montre une corrélation positive dans tous les calcites. La pente de cette corrélation est différente entre les calcites des minéralisations massives et des structures extensives (Figure IV.10E). La relation entre V vs Cr montre également une nette corrélation entre ces deux éléments pour l'ensemble des calcites. Un enrichissement en As est remarqué dans les calcites des minéralisations massives comparées aux autres calcites.

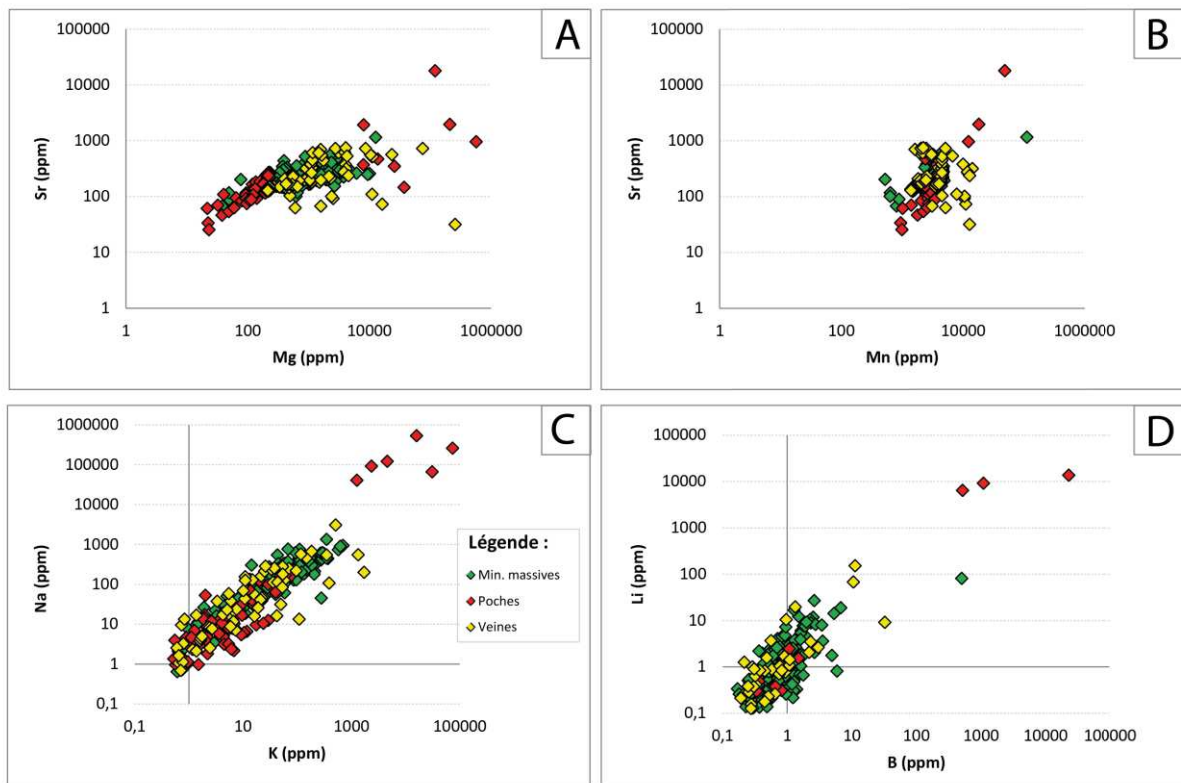


Figure IV.9: Diagrammes binaires entre A) Sr vs Mg, B) Sr vs Mn, C) Na vs K et D) Li vs B dans les calcites de Bou Azzer (Données LA-ICP-MS)



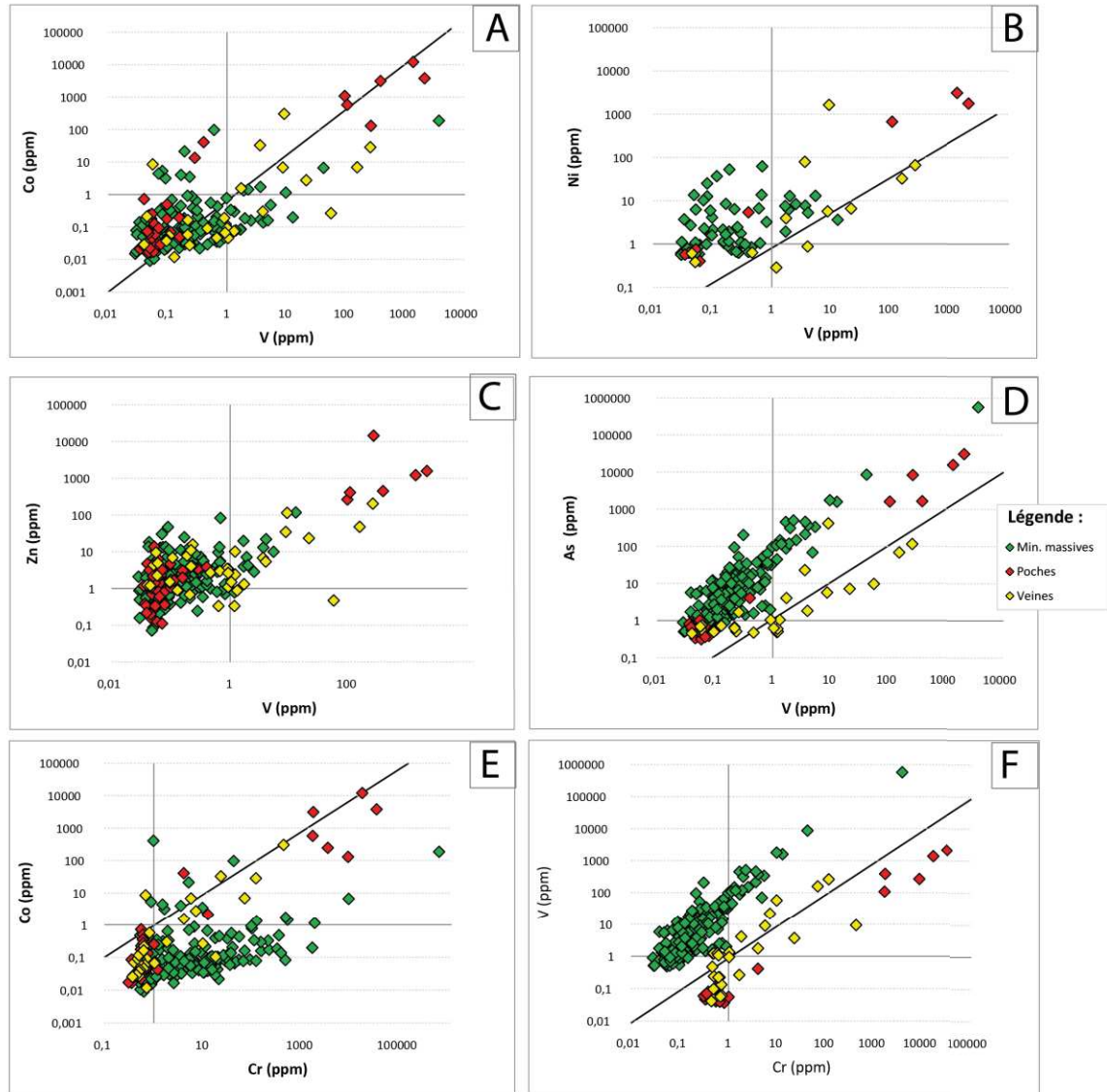


Figure IV.10 : Diagrammes binaires de distribution des éléments en trace entre A) Na vs K, B) Li vs B, C) Co vs V, D) Ni vs V, E) Co vs Cr, F) Zn vs V, G) As vs V et H) V vs Cr (avec les coefficients de détermination  $R^2$  selon une courbe de tendance linéaire) dans les calcites des structures de Bou Azzer (Données LA-ICP-MS)

Le lien entre le Ni et Co montre une corrélation positive nette entre ces deux éléments et ce, pour toutes les calcites (Figure IV.11A). On notera aussi l'étendu et les Ni variations des concentrations en Ni et Co, des inclusions de minéralisations de Co ou de Ni pourraient expliquer ces variations. Les calcites associées aux minéralisations massives possèdent les concentrations les plus riches en Ni, par rapport aux calcites des veines et des poches, ce qui est en accord avec les minéralogies observées (Figure IV.11A). Le rapport entre le Co et le Fe indique également une corrélation positive surtout dans les calcites associées aux veines (Figure IV.11B). Un enrichissement plus important en Fe est observé par rapport au Co (Figure IV.11B). Ces observations sont également en accord avec l'apparition des phases riches en Fe dans les arséniures et les sulfures dans les structures les plus tardives, i.e., les veines et poches. Les diagrammes Zn vs Pb et Bi vs Pb montrent

des corrélations positives nettes dans les calcites de Bou Azzer (Figure IV.11C et D). Le Co a été comparé aux éléments majeurs constituant les calcites, i.e. Mn et Mg (Figure IV.11E et F, respectivement). La même observation peut être faite concernant l'enrichissement et la distinction en Mn et en Mg entre les calcites des poches avec ceux des minéralisations massives et des veines.

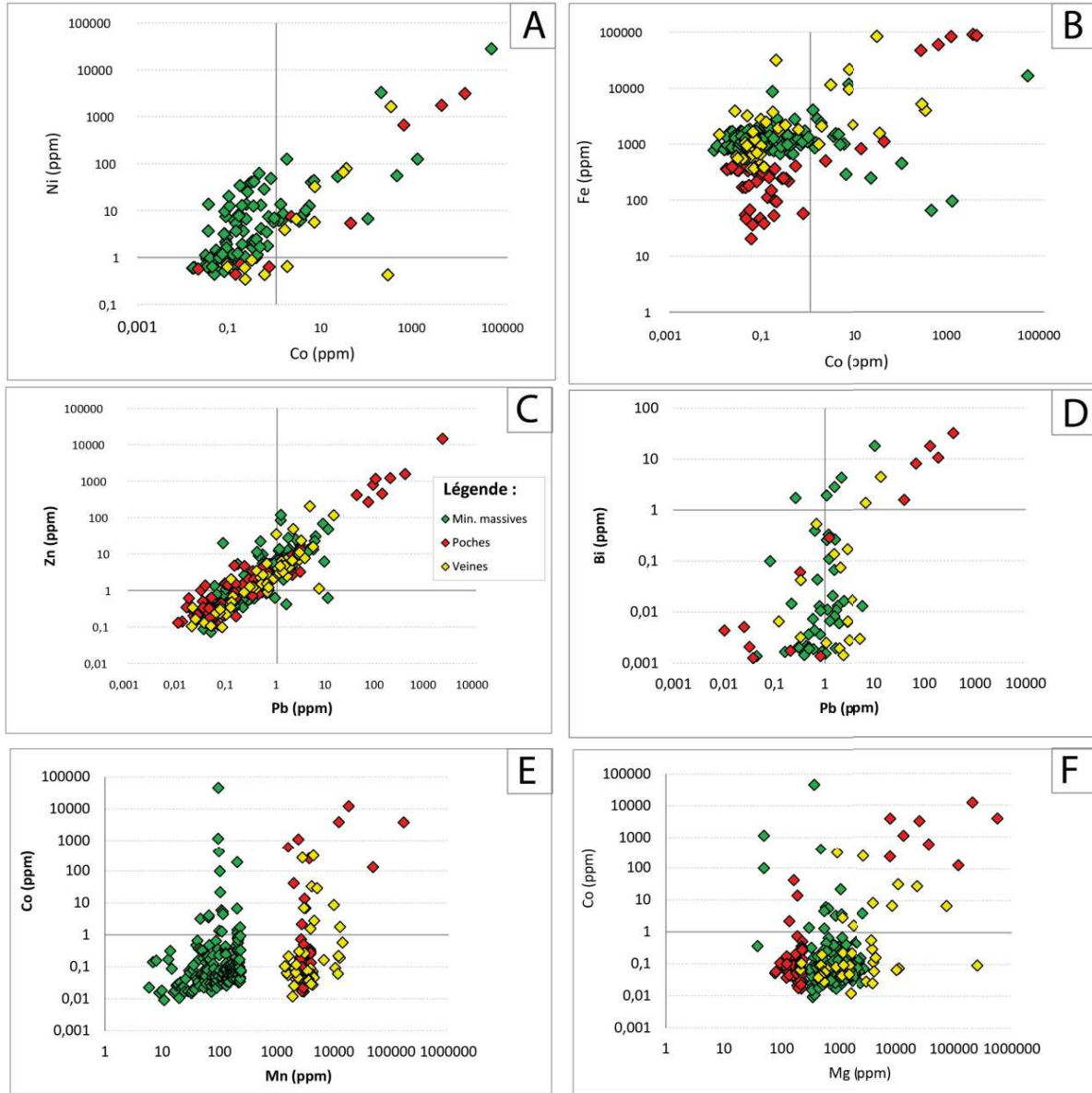
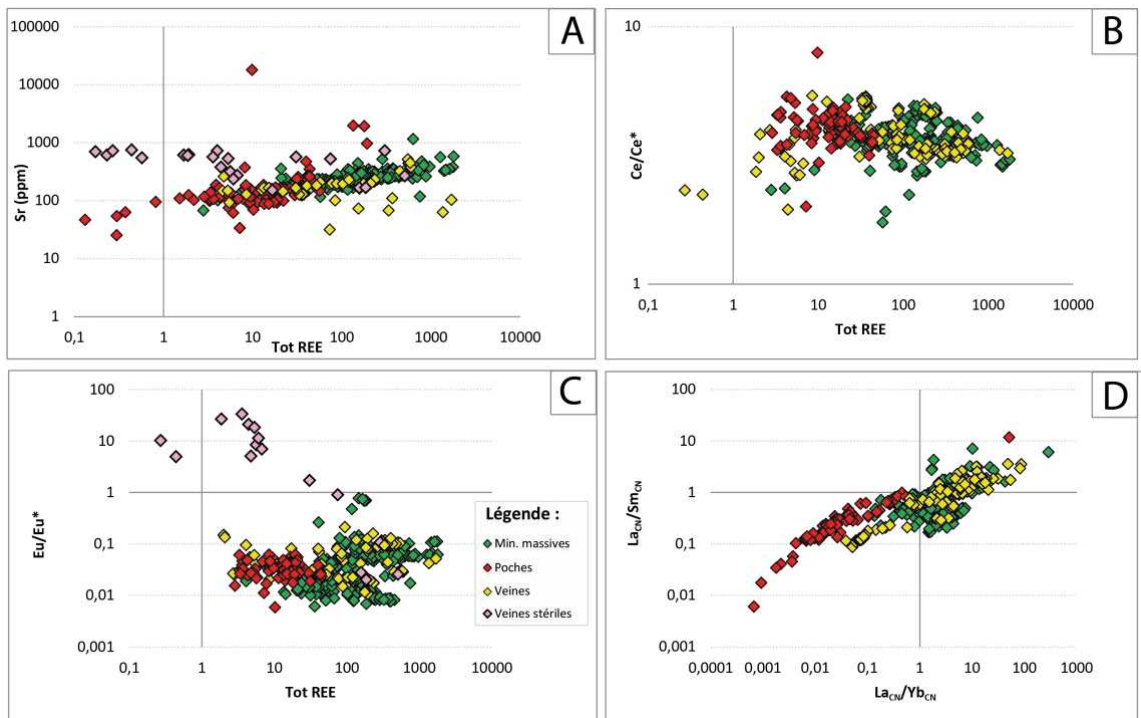


Figure IV.11: Diagrammes binaires entre A) Ni vs Co, B) Fe vs Co, C) Zn vs Pb, D) Bi vs Pb, E) Co vs Mn, F) Co vs Mg dans les calcites de Bou Azzer (Données LA-ICP-MS)

**L'analyse élémentaire des terres rares.** Il existe deux manières d'analyser les données sur les Terres Rares (TR) : les graphiques qui somment les données des terres rares ( $\Sigma$ TR) et les représentations spectrales.

Le graphique de la Figure IV.12A montre une corrélation positive entre  $\Sigma$ TR et le Sr, à l'exception des calcites tardives (Calc 5) associées aux veines stériles (Figure IV.12A). La discrimination de ces veines par rapport aux calcites est possible et peut montrer une origine différente du fluide. Le rapport  $\text{Eu}_{\text{CN}}/\text{Eu}_{\text{CN}}^*$  et en  $\text{Ce}_{\text{CN}}/\text{Ce}_{\text{CN}}^*$  permet de savoir si l'anomalie en Europium et en Cérium est négative ou positive ; si elle est positive, le rapport sera supérieur à 1 ; si elle est négative, le rapport sera inférieur à 1. Les rapports dans les calcites des veines stériles ont des valeurs en  $\text{Eu}_{\text{CN}}/\text{Eu}_{\text{CN}}^*$  supérieures à 1. L'anomalie en europium sera positive. Les calcites des minéralisations massives, des poches et des veines associées aux minéralisations ont un rapport  $\text{Eu}_{\text{CN}}/\text{Eu}_{\text{CN}}^*$  inférieur à 1. L'anomalie en europium sera négative (Figure IV.12C). Concernant le rapport en  $\text{Ce}_{\text{CN}}/\text{Ce}_{\text{CN}}^*$ , toutes les valeurs sont supérieures à 1, l'anomalie est positive. Ces rapports sont comparés à  $\Sigma$ TR. Les deux diagrammes permettent de discriminer les calcites des poches des autres générations de carbonates (Figure IV.12B et C) et d'y voir une différence quant à  $\Sigma$ TR. Les rapports  $\text{La}_{\text{CN}}/\text{Sm}_{\text{CN}}$  vs  $\text{La}_{\text{CN}}/\text{Yb}_{\text{CN}}$  sont considérés comme des indicateurs d'enrichissement en terres rares légères (Reynard et al., 1999). Les rapports montrent, encore une fois, une nette différence entre les calcites des poches et celles formées dans les minéralisations massives et les veines (Figure IV.12D).



**Figure IV.12 : Diagrammes binaires des éléments en traces et  $\Sigma$ TR normalisés aux chondrites dans les calcites de Bou Azzer. A) Sr vs  $\Sigma$ TR, B) Ce/Ce\* vs  $\Sigma$ TR, C) Eu/Eu\* vs  $\Sigma$ TR, D)  $\text{La}_{\text{CN}}/\text{Sm}_{\text{CN}}$  vs  $\text{La}_{\text{CN}}/\text{Yb}_{\text{CN}}$ . (Données LA-ICP-MS) ( $\text{Eu}/\text{Eu}_{\text{CN}} = \text{Eu}_{\text{CN}}/[0.5*\text{Sm}_{\text{CN}}+0.5*\text{Gd}_{\text{CN}}]$  ;  $\text{Ce}/\text{Ce}_{\text{CN}} = \text{Ce}_{\text{CN}}/[0.5*\text{La}_{\text{CN}}+0.5*\text{Pr}_{\text{CN}}]$ )**

Les spectres des TR normalisées aux chondrites des quatre environnements de dépôts où les minéralisations ont été observées, i.e. la serpentinite, les minéralisations massives, les veines et les poches, sont présentés dans la figure IV.13.

Les spectres des TR normalisées aux chondrites des carbonates composant la serpentinite localisée loin des zones minéralisées montrent un enrichissement d'un ordre de grandeur en TR par rapport à la norme chondritique. De plus, un enrichissement en TR légères et un appauvrissement en TR lourdes sont observés (Figure IV.13A). Une anomalie en Europium normalisée aux chondrites ( $Eu_{CN}$ ) est également visible.

Les spectres des TR normalisées aux chondrites dans les calcites des minéralisations massives montrent un enrichissement de un à trois ordres de grandeur en TR par rapport à la norme chondritique. Les spectres des calcites indiquent également une forte anomalie en  $Eu_{CN}$  (Figure IV.13B2). Les calcites présentent un appauvrissement en TR légères et lourdes (Figure IV.13B). Les calcites bréchiques (Calc 2.1) montrent des spectres plus étendus en concentration et hétérogènes (Figure IV.13B2) et les calcites rhomboédriques (Calc 2.2) présentent deux types de spectres, l'un montre un appauvrissement et l'autre un enrichissement en TR légères et lourdes (Figure IV.13B2). Cette signature peut marquer des hétérogénéités dans les carbonates ou un changement de la nature du fluide.

Les spectres de TR normalisées aux chondrites des carbonates formés dans les veines montrent un enrichissement de deux ordres de grandeur par rapport à la norme chondritiques (Figure IV.13C). Les premiers carbonates à se former dans les veines sont la calcite 3 et la dolomite 1. Leurs spectres de TR montrent un appauvrissement en TR légères et lourdes et une anomalie négative en  $Eu_{CN}$  (Figure IV.13C). Les calcites bréchiques (Calc 4.1) et rhomboédriques formées après décrivent un enrichissement en TR légères et lourdes (Figure IV.13C1). La calcite (Calc 5) formée dans les veines tardives et stériles montre une anomalie positive en  $Eu_{CN}$  (Figure IV.13) et un appauvrissement en TR par rapport à la norme chondritique (Figure IV.13C). Deux types de spectres sont observés : un enrichissement en TR légères et lourdes (Figure IV.13C1) et un appauvrissement en TR légères et lourdes (Figure IV.13C2). Les données obtenues par Oberthür et al. (2008) dans des veines Coifères de Bou Azzer est montre des spectres enrichis en TR d'un à deux ordres de grandeur, et un appauvrissement en TR lourdes (Figure IV.13C3).

Les spectres de TR normalisées aux chondrites dans les calcites des poches sont appauvris en TR légères par rapport aux chondrites de deux ordres de grandeur et enrichis en TR lourdes d'un ordre de grandeur (Figure IV.13D). Les spectres des calcites montrent de fortes anomalies en  $Eu_{CN}$  (Figure IV.13D). La calcite bréchique (Calc 4.1) montre deux types de spectres de TR : un enrichissement en TR légères et lourdes (Figure IV.13D1) et un enrichissement de TR lourdes uniquement (Figure

IV.13D2). Il en va de même pour la calcite rhomboédrique (Calc 4.2), où un enrichissement de TR lourdes est uniquement observé. Cette différence dans les calcites à texture bréchique peut s'expliquer par une remobilisation des éléments lors de la bréchification des carbonates, et donc d'une incorporation différente des TR dépendant de la nature du fluide.

Globalement, la variabilité des concentrations est plus importante dans les carbonates associés aux veines par rapport à ceux des minéralisations massives. Les carbonates analysés dans la serpentinite, les minéralisations massives (Figure IV.13B), dans les veines minéralisées (Figure IV.13C1) et dans la dolomite (Dol 1) (Figure IV.13C1) décrivent le même comportement en TR légères et le même appauvrissement en TR lourdes. Les données sont également toutes supérieures aux chondrites. L'anomalie négative en  $Eu_{CN}$  est la même dans les carbonates des différents environnements. Les calcites formées les veines stériles ont des profils de TR différent de tous les autres carbonates car l'anomalie en  $Eu_{CN}$  est positive (Figure IV.13C2). L'anomalie en Europium ( $Eu^{2+}$ ) est courante dans les calcites car il peut se substituer avec le  $Ca^{2+}$  (Sinha, 1983). Ces calcites montrent un enrichissement conséquent en Mn par rapport aux autres générations de calcite. Le fluide donne une signature différente pour cette génération tardive de calcite. Les calcites analysées par Oberthür et al. (2008) dans des veines minéralisées en Co montre une signature identique aux calcites analysées lors de cette étude dans le type de minéralisation des veines (Figure IV.13C1).

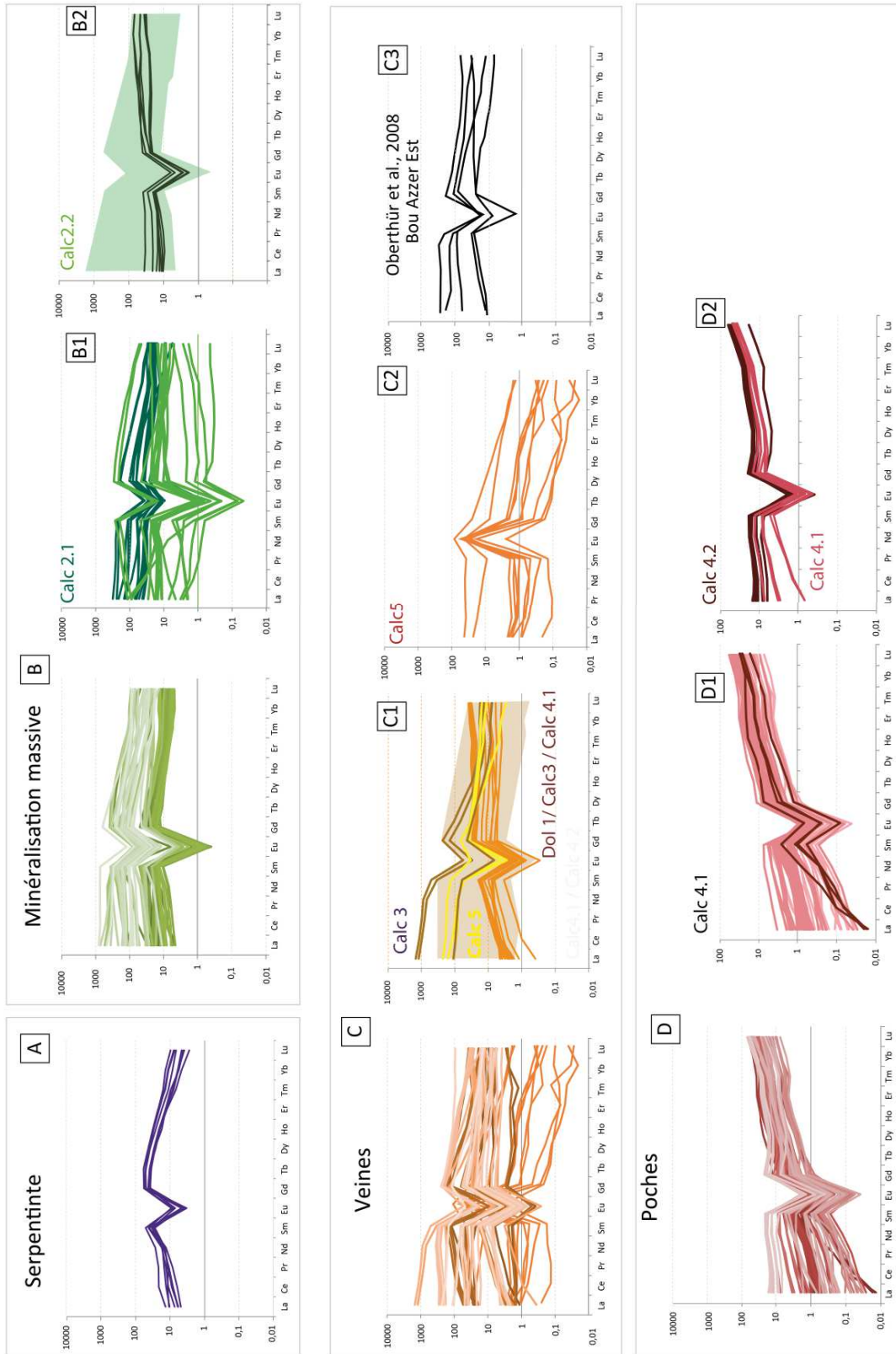


Figure IV.13 : Spectres des terres rares normalisés aux chondrites d'après McDonough & Sun (1995) des carbonates provenant A) de serpentines carbonatées, B) des minéralisations massives, C) des poches et D) des veines de Bou Azzer (Données LA-ICP-MS)

## 2. Les spinelles

Les diagrammes Na vs K et Li vs B décrivent des corrélations positives entre les éléments (Figure IV.13A et B ; Annexe IV.4). Le comportement du V et du Cr est comparé aux métaux les plus enrichis dans les carbonates (Ni, Co, Zn et As). L'intérêt est toujours de montrer le lien éventuel entre la gangue carbonatée, le manteau serpentinisé et les spinelles, qui sera discuté dans le chapitre VI. Les diagrammes Zn vs V, Co vs Cr, et V vs Cr indiquent également des corrélations positives (Figure IV.13C, E, F). Le diagramme As vs V ne montre pas de corrélation entre les deux éléments. Un enrichissement en As est remarqué dans les spinelles des minéralisations massives par rapport au V, ce qui est en accord avec la formation des arséniures et les minéralogies observées (Figure IV.13D).

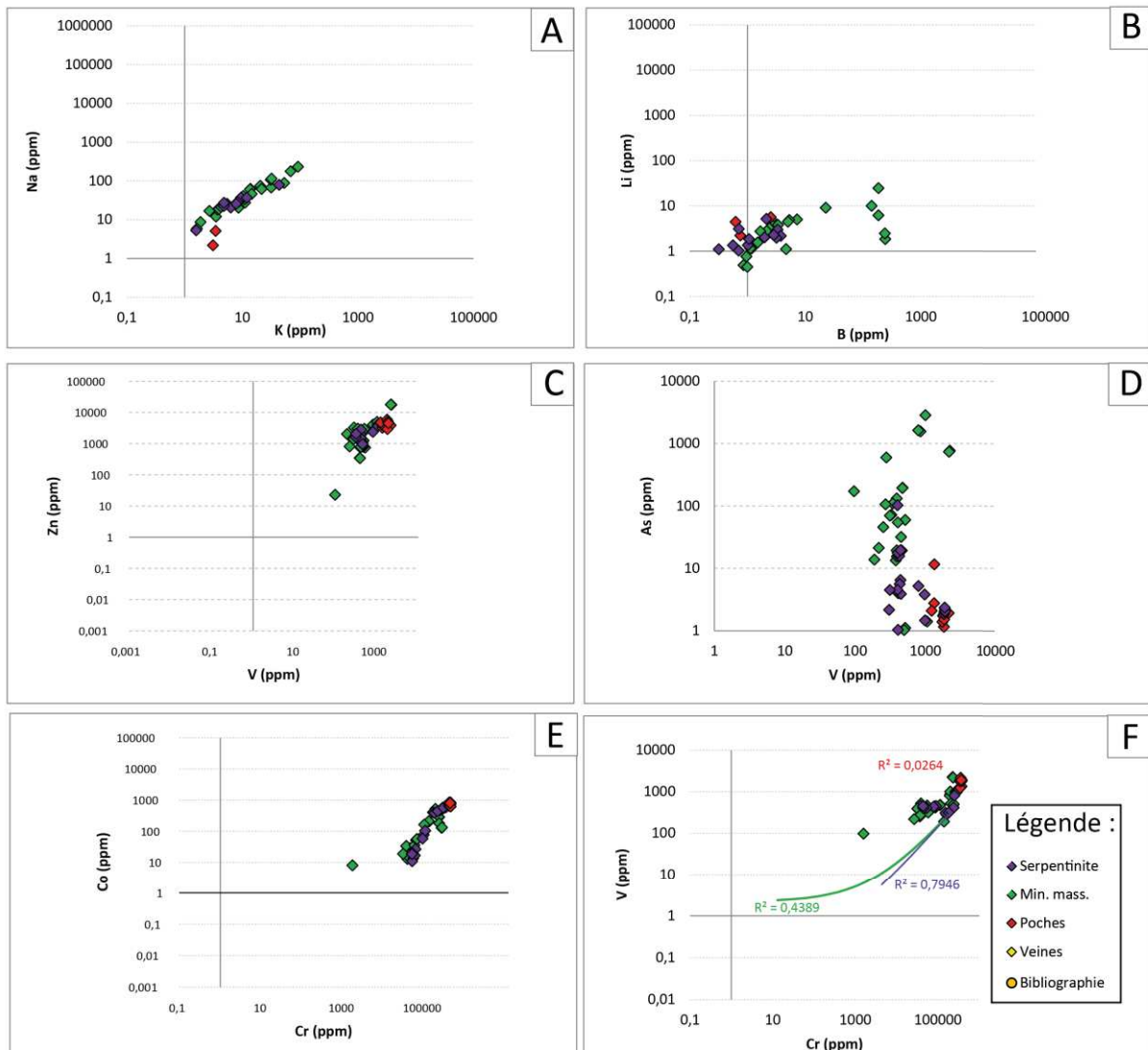


Figure IV.13 : Diagrammes binaires en éléments traces A) Na vs K, B) Li vs B, C) Zn vs V, D) As vs V, E) Co vs Cr, et F) V vs Cr dans les différents spinelles (Données LA-ICP-MS)

Le diagramme IV.14A compare les teneurs en certains métaux dans les spinelles observés en fonction de leur chronologie relative supposée dans les affleurements du gisement de Bou Azzer. Les spinelles de la serpentinite, des minéralisations massives et les poches montrent des enrichissements en Zn, Ni (entre 217 et 1858 ppm), Co (entre 167 et 745 ppm) et Cu (entre 2 et 10 ppm) (Figure IV.14A). Les teneurs moyennes sont équivalentes entre les trois habitus (entre 2317 et 4185 ppm). Les spinelles des poches sont enrichis d'un ordre de grandeur en Co et Cu par rapport aux deux autres habitus, mais ne présentent aucune concentration en Bi (Figure IV.14A) Les teneurs en Pb sont très variables et inférieures à 1‰. Le diagramme Ni vs Co montre une corrélation négative entre ces éléments (Figure IV.14B) avec les teneurs les plus riches en Co dans les spinelles des poches. Les données obtenues par El Ghorfi et al. (2007) dans des lentilles de chromites du manteau serpentinisé de Bou Azzer (données de la littérature dans la figure IV.14B) indiquent des compositions très appauvries en Ni et Co, comparées aux spinelles associés à la serpentinite, aux minéralisations massives et aux poches. Les spinelles ne montrent pas de corrélation entre le Zn et le Pb (Figure IV.14C). Les spinelles montrent une corrélation positive entre le Bi et le Pb mais avec des pentes différentes selon l'habitus (Figure IV.14D).

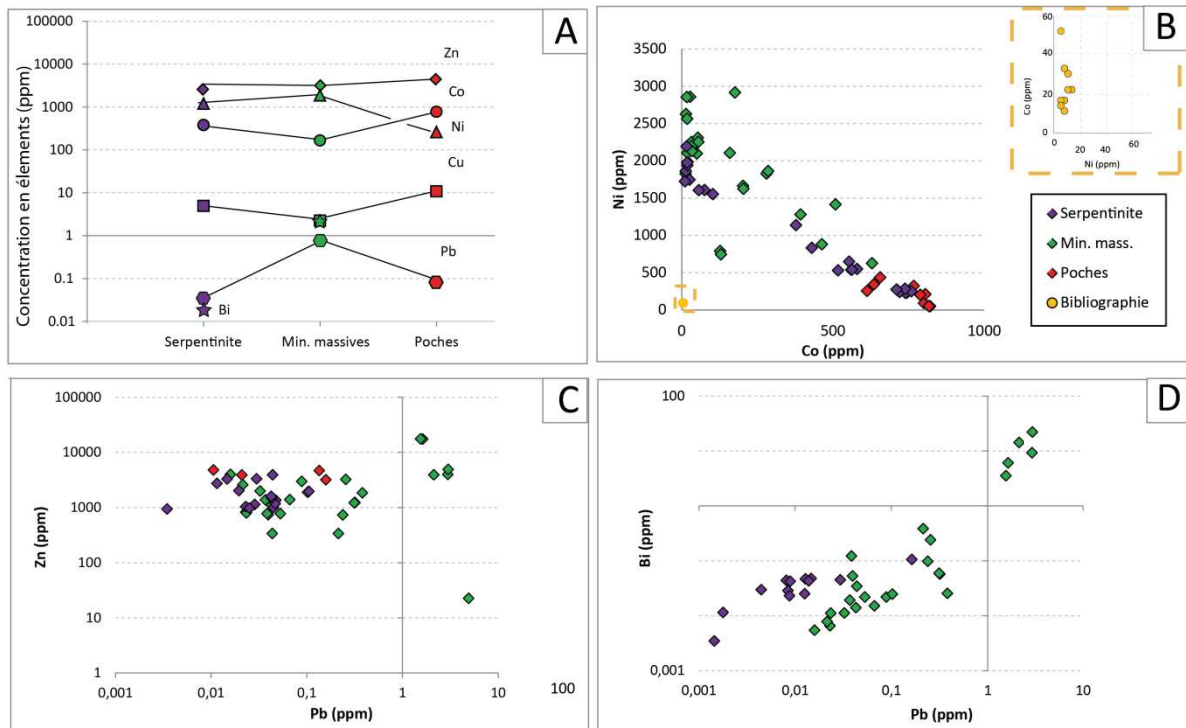


Figure IV.14 : Diagrammes binaires en métaux A) comparaison dans le temps des concentrations en métaux et B) Co vs. Ni comparé aux données de spinelles d'après El Ghorfi et al. (2007), C) Zn vs. Pb, D) Bi vs. Pb dans les différents spinelles (Données LA-ICP-MS)



Ce qu'il faut retenir :

Les analyses géochimiques menées sur les arséniures, les gangues carbonatées et les spinelles ont permis d'obtenir les résultats suivants :

- Les arséniures se formant dans les trois types de minéralisations sont enrichis en éléments majeurs : en Co, Ni, Fe, As ; et en métaux de base : Cu, Pb ; Ge, Sb, Bi, Ag et Au. Les sulfures sont enrichis en Zn, Ge, As et Au. Ces enrichissements en métaux sont également observés dans les carbonates et les spinelles : en Bi, Zn, Cu, Co, Ni et As.
- Les gangues carbonatées montrent presque systématiquement une chute des concentrations en métaux dès la mise en place des carbonates dans les structures extensives, i.e. les veines et les poches. Les carbonates montrent des corrélations positives entre Zn vs Pb, Bi vs Pb, Co vs V et négative entre Ni vs Co. Les spinelles décrivent une corrélation négative entre Ni vs Co.
- L'étude des Terres Rares (TR) a permis de montrer que les calcites des veines et des minéralisations massives exposent les mêmes spectres de TR avec un appauvrissement en TR légères et lourdes, sauf avec les poches et les calcites dans les veines stériles. Les calcites associées aux poches montrent un enrichissement en TR légères et lourdes et les veines stériles une anomalie en  $Eu_{CN}$  positive et non négative.
- Une signature particulière a été observée dans les carbonates et les spinelles mise en évidence par les corrélations positives entre Na vs K, Li vs B, V vs Cr, As vs V, Zn vs V, Co vs Cr.

# **Chapitre V : Géochronologie**



## A. Introduction

A la suite d'un projet INSU/CNRS « Datation U-Pb in-situ sur carbonates et analyse pétro-structurale des mines de Bou Azzer et d'Imiter », l'objectif a été de déterminer les âges de phases minérales liés aux minéralisations de Bou Azzer, en milieu d'année 2019, au laboratoire Géosciences Rennes de l'Université de Rennes 1, grâce à la collaboration avec M. Pujol. Les phases minérales (calcite, apatite, sphène) étudiées pour l'étude géochronologique se basera sur l'étude pétro-structurale présentée dans le chapitre II.

## B. La méthode de datation U/Pb

La géochronologie U-Pb a été réalisée par spectrométrie de masse avec plasma induit par ablation laser in situ (LA-ICP-MS) au laboratoire Géosciences Rennes à l'aide d'un laser excimer ESI NWR193UC couplé à un quadripôle Agilent 7700x ICP-MS et équipé d'un double système de pompage permettant d'améliorer la sensibilité (Paquette et al. 2014) (Figure V.1).

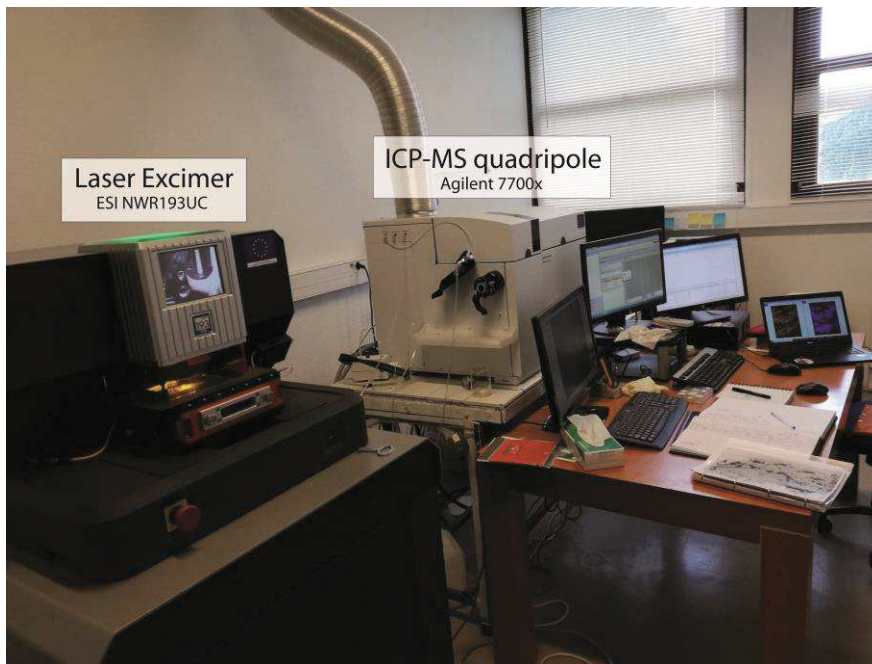


Figure V.1 : Laser Excimer couplé à un ICP-MS quadripôle du laboratoire de Géosciences Rennes

La partie de l'échantillon choisie pour datation est dans un premier temps attaquée et extraite par le laser, transporté par l'hélium, et ensuite mélangée avec du diazote et de l'argon avant d'être injectée dans la source de plasma. L'alignement de l'instrument et l'étalonnage en masse ont été effectués avant chaque session d'analyse grâce au verre de référence NIST SRM 612, en inspectant le signal  $^{238}\text{U}$  et en minimisant le rapport  $\text{ThO}^+ / \text{Th}^+$  ( $<0,5\%$ ). Au cours d'une analyse, les signaux des masses  $^{43}\text{Ca}$ ,  $^{204}(\text{Pb} + \text{Hg})$ ,  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Pb}$  et  $^{238}\text{U}$  sont acquis. Le signal  $^{235}\text{U}$  est calculé à partir de  $^{238}\text{U}$  sur la base du rapport  $^{238}\text{U} / ^{235}\text{U} = 137,88$ . Les analyses simples consistaient en une intégration

en arrière-plan de 20 secondes suivie d'une intégration de 60 secondes avec le tir au laser, puis d'un délai de 10 secondes pour éliminer le précédent. Trois types de matériel ont été sélectionnés pour la géochronologie absolue : des calcites, des apatites et des titanites. Les paramètres associés à l'ablation des minéraux sont reportés dans le Tableau V.1. Les mêmes paramètres ont été utilisés pour tous les standards et les cristaux afin de conserver les mêmes conditions analytiques pour chaque analyse.

**Tableau V.1 : Tableau des paramètres associés à l'ablation des minéraux**

Minéral	Diamètre du spot d'ablation	Fréquence d'impact	Densité d'énergie
Calcite	100	10	5,5 J/cm <sup>2</sup>
Apatite	20	5	5,6 J/cm <sup>2</sup>
Titanite	40	5	5,5 J/cm <sup>2</sup>

Pour chaque échantillon, nous avons utilisé la procédure de bracketing standard suivante.

- Deux standards d'apatite de Madagascar (âge ID-TIMS de  $473,5 \pm 0,7$  Ma; Cochrane et al. 2014) ont été utilisées comme matériel de référence primaire pour l'apatite : une apatite de Durango ( $31,44 \pm 0,18$  Ma; McDowell et al. 2005) et une apatite de McClure ( $523,51 \pm 2,09$  Ma; Schoene & Bowring 2006). Les analyses des douze grains d'apatite sélectionnés pour l'étude ont ensuite été réalisées.
- Trois standards de titanite KHAN (522 Ma; Heaman 2009) et un standard de titanite LAC (520 Ma; Pedersen et al. 1989) ont été utilisées comme matériel de référence primaire pour les titanites. Les six grains sélectionnés ont ensuite été analysés.
- Deux standards de calcite WC1 ( $257 \pm 3$  Ma, Roberts et al., 2017) ont été utilisées comme matériau de référence primaire suivies de six analyses de grains de calcites de nos échantillons.

Ces séquences ont ensuite été répétées cinq fois avec, à la fin de chaque session, trois analyses des standards de Madagascar pour les apatites, de KHAN pour les titanites et de WC1 pour les calcites. Les données ont été corrigées pour le fractionnement U – Pb et pour le biais de masse par les mesures répétées des standards. Les mesures des étalons d'apatite de Durango et de McClure et de titanite LAC ont été traitées comme des inconnues et utilisées pour contrôler la reproductibilité et la précision des corrections. Concernant les calcites, les analyses de calcite WC1 ont également servi d'étalon. Les âges obtenues sur les grains d'apatite, de titanite et de calcite ont été calculés et insérés dans des diagrammes Tera-Wasserburg (1972) utilisant le logiciel Isoplot/Ex (Vermeesch, 2018) et R (développé par Ludwig, 2012) avec des erreurs à  $2\sigma$ . Le diagramme de Terra-Wasserburg permet d'illustrer les rapports isotopiques mesurés, non corrigés par rapport au plomb commun. Il est possible de mettre en avant la présence de plomb commun dans les minéraux analysés suivant une ligne

verticale le long du rapport  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  ; suivant une ligne horizontale, le rapport  $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  augmente et indique une perte en plomb radiogénique (Figure V.2). Le MSDW représente, en géochronologie, le degré de cohérence au sein d'un jeu de données donné; supérieur à 2.2, les résultats obtenus seront considérés comme peu fiables (Wendt & Carl, 1991).

La détermination des zones intéressantes à étudier s'est faite en deux étapes :

1. La caractérisation de la paragenèse minérale grâce à l'étude pétro-structurale, texturale et minéralogique (Chapitre II) a permis de cibler i) les calcites reliées aux minéralisations du gisement de Bou Azzer, ii) les apatites principalement liées à la diorite quartzique et aux minéralisations d'arséniures de fer et iii) les titanites observées dans la diorite quartzique.
2. La sélection des calcites a ensuite été affinée en choisissant celles qui montraient les concentrations en  $^{238}\text{U}$  les plus élevées suite aux analyses ICP-MS effectuées à l'ETH de Zurich (Chap. IV.). Pour les apatites et les titanites, les analyses ont ciblé les cœurs et les bordures de chaque grain en fonction des images faites par cathodoluminescence et les observations microscopiques, afin de distinguer les éventuels effets d'une altération hydrothermale.

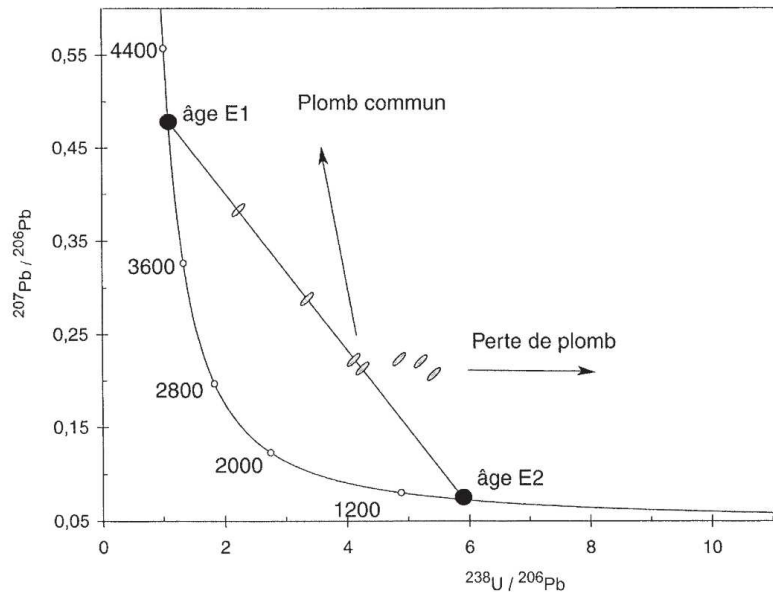


Figure V.2 : Diagramme Concordia de Terra-Wasserburg (1972) exprimant les pertes en plomb radiogénique et les gains en plomb commun

### C. Les minéraux étudiés

Comme dit ci-dessus, la calcite, l'apatite et la titanite ont été utilisés pour la géochronologie U/Pb et leur sélection a été basée sur l'évolution paragénétique (Figure V.3 et V.4) établie lors de ce travail. La Figure V.4 représente plus précisément la localisation des minéraux étudiés en lien avec les différents types de minéralisations de Bou Azzer.

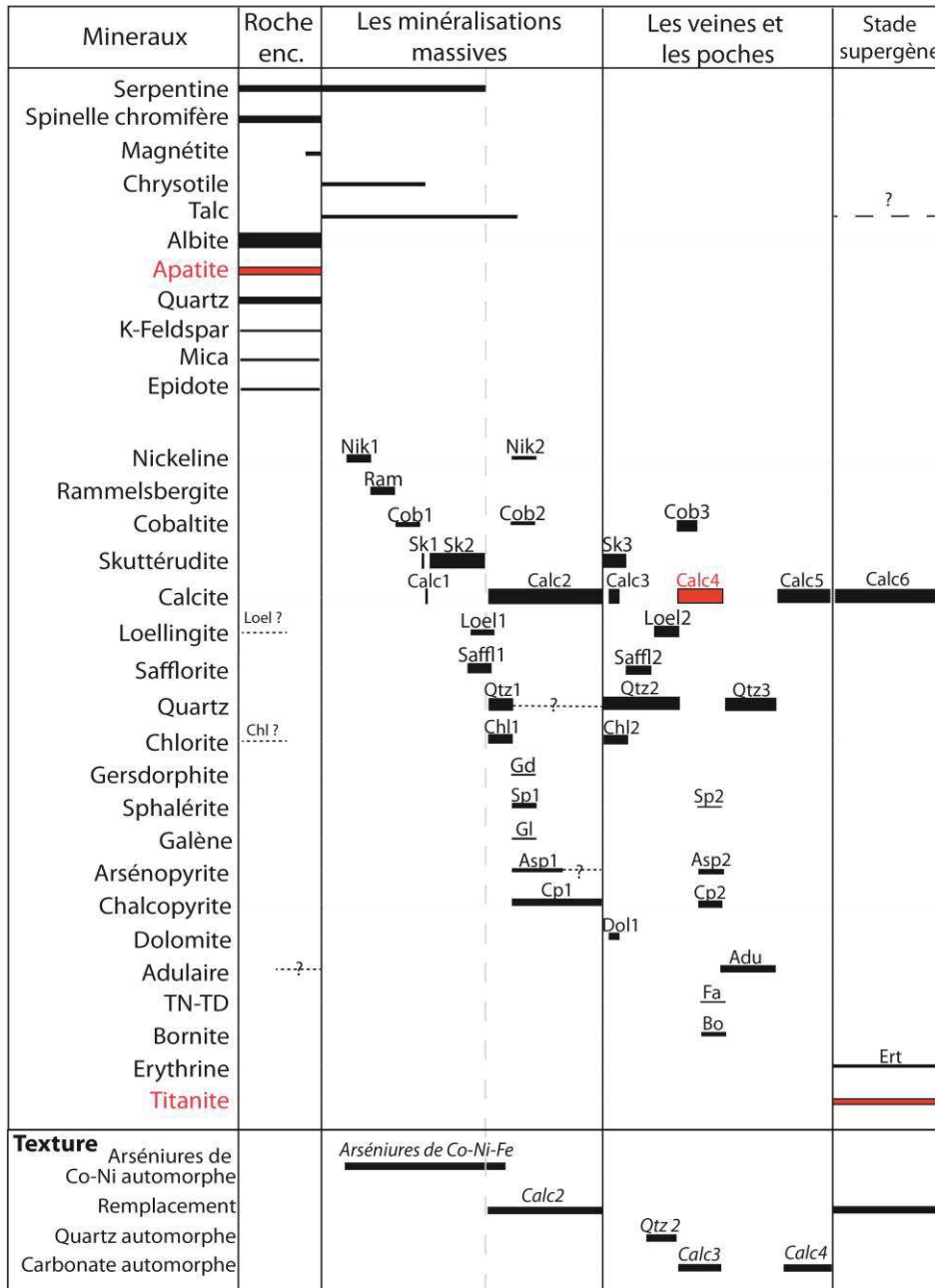


Figure V.3 : Evolution paragénétique des minéralisations du gisement de Bou Azzer. Les minéraux datés sont présentés en rouge

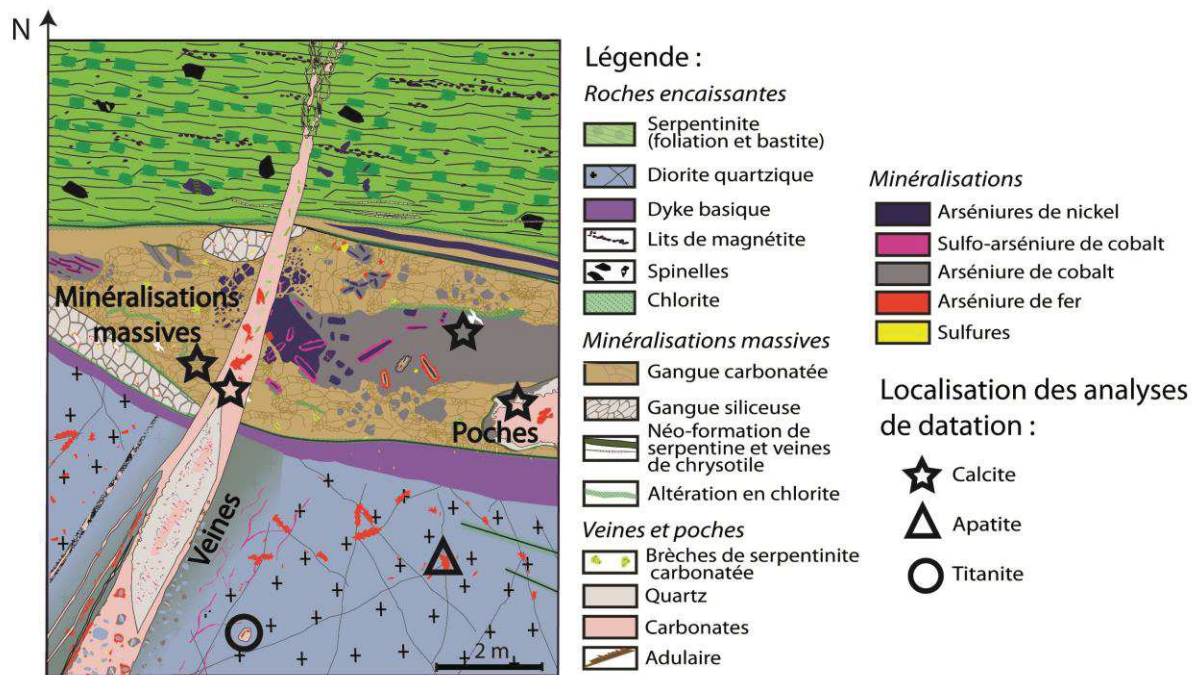


Figure V.4 : Localisation des zones sélectionnées pour la datation des calcites (Etoile) ; apatites (Triangle) et titanite (Cercle).

### 1. Calcite

Depuis peu, la méthode de datation U-Pb est appliquée avec succès à des minéraux dont les concentrations en uranium sont inférieures à celles généralement utiles avec les méthodes in situ SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometer) (Coogan et al., 2016). La calcite est de par sa nature et son abondance un minéral cible de premier ordre et sa datation a été récemment envisagée grâce au fait qu'elle puisse contenir de l'uranium. En fait, les calcites ayant une teneur d'au moins 1 ppm d'uranium sont considérées comme « datables » par les méthodes à LA-ICP-MS. Ainsi, l'application de la méthode de datation sur carbonates en contexte minéralisé semble être une méthode nécessaire à l'établissement de modèles métallogéniques contraints dans le temps. La calcite associée aux minéralisations massives (calc 2.2) visible sur la Figure V.5A ne présente pas de texture particulières. Il en va de même pour la calcite (calc 4.2) associée aux veines et aux poches (Figure V.5B et C). La datation de la calcite est donc tout particulièrement intéressante de par sa relation très étroite avec les différentes phases minéralisées de Bou Azzer. La calcite apparaît dans tous les stades mis en évidence (Figure V.3).



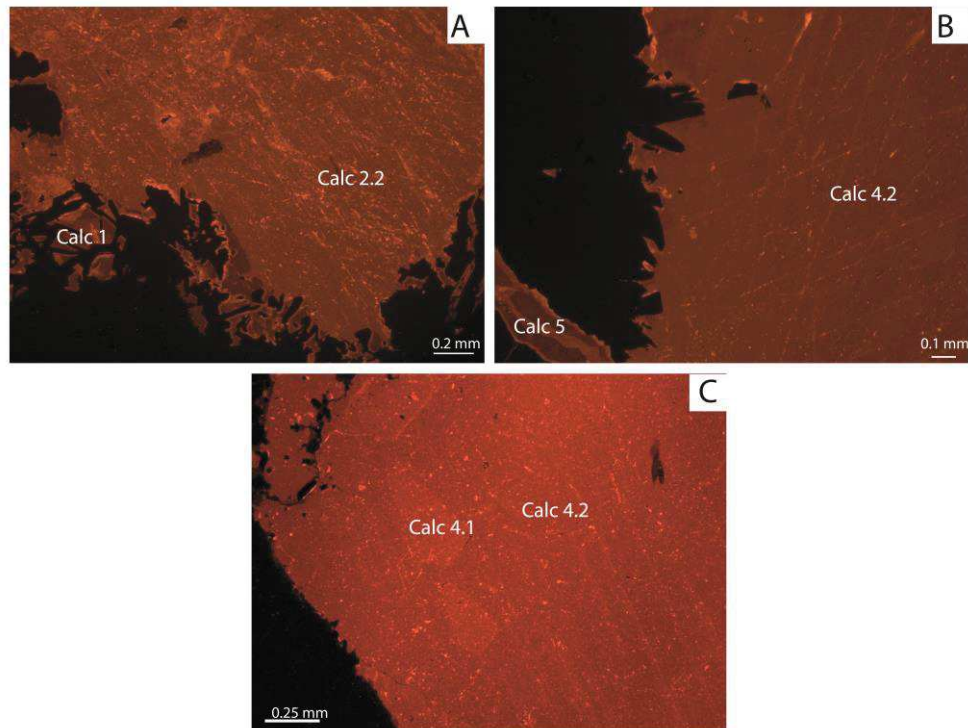


Figure V.5 : Images en cathodoluminescence des calcites sélectionnées pour les datations. Elles sont associées A) aux minéralisations massives (lame BAE21b), B) aux veines (lame BAE23b), C) aux poches (BAE59a1) (calc: calcite)

## 2. Apatite

Les apatites sélectionnées dans la diorite quartzique peuvent être, d'après la paragenèse, en lien génétique avec les minéralisations d'arséniures de fer, c'est-à-dire les loellingites. Pour rappel, la loellingite incluse dans la diorite ne montre pas les mêmes compositions que la loellingite comprise dans les minéralisations massives mais des valeurs en arsenic et en fer équivalentes à la loellingite reliée aux veines et aux poches (Figure II.40).

Douze apatites ont été analysées in-situ au La-ICP-MS. Elles sont situées dans des fractures à chlorite et loellingite qui recoupent la diorite quartzique. Elles sont rarement automorphes et montrent des formes arrondies (Figure V.6A, B et D). Leur taille varie entre 10 et 250  $\mu\text{m}$ . Certaines apatites ont une auréole d'altération visible en cathodoluminescence (Figure V.6C). Les apatites sont soit associées à la chlorite et à la loellingite dans des micro-fractures parallèles à la foliation de la diorite (Figure V.6A et D) ou soit disséminées dans la diorite (Figure V.6B et C).

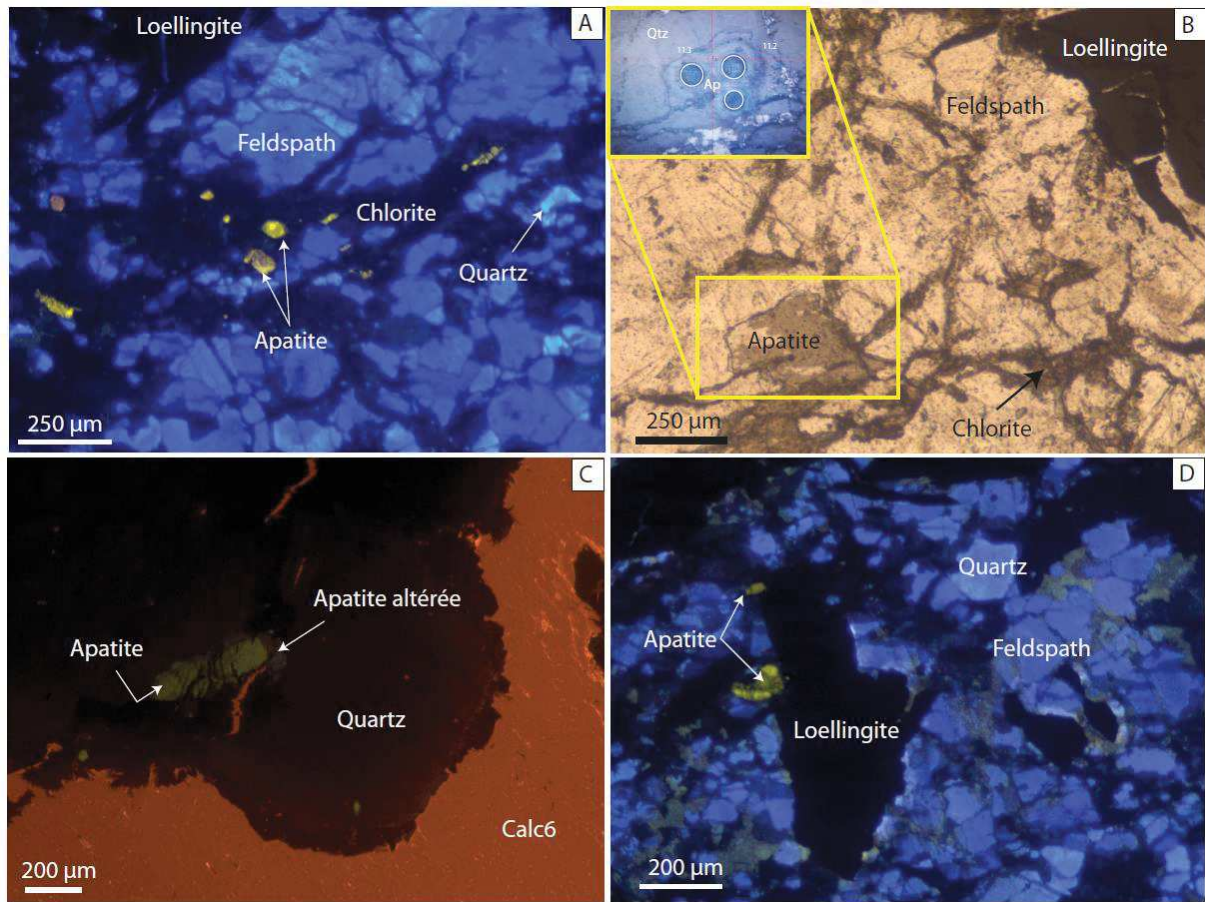


Figure V.6 : A-C-D) Photo en cathodoluminescence et B) en lumière naturelle montrant la localisation des apatites dans les fractures à chlorite et loellingite. A-B-D) lame BA8b et C) lame BAE73c1. Zoom sur les points d'analyses au LA-ICP-MS (lumière réfléchie)

### 3. Titanite

La position des titanites reste difficile à déterminer et il est délicat, à ce stade, de savoir si elles sont liées à la diorite quartzique ou bien hydrothermales. Les titanites analysées sont localisées au voisinage d'une veine minéralisée en arséniures de cobalt et arséniures de fer (Figure V.7A). Les titanites ont été uniquement observées dans la diorite quartzique et sont étroitement associées à la chlorite et à la calcite à texture automorphe et à fort clivage (Figure V.7B et C). La forme des titanites est automorphe, et parfois les bordures semblent altérées (Figure V.7B). Leur taille varie de 30 µm à 100 µm. Une chloritisation est visible au bord du filon, ainsi qu'une forte fracturation au sein de la diorite ; mais les titanites ne montrent pas de lien direct avec la minéralisation (Figure V.7A), elles semblent associées à un événement hydrothermal tardif lié à la mise en place de la chlorite.

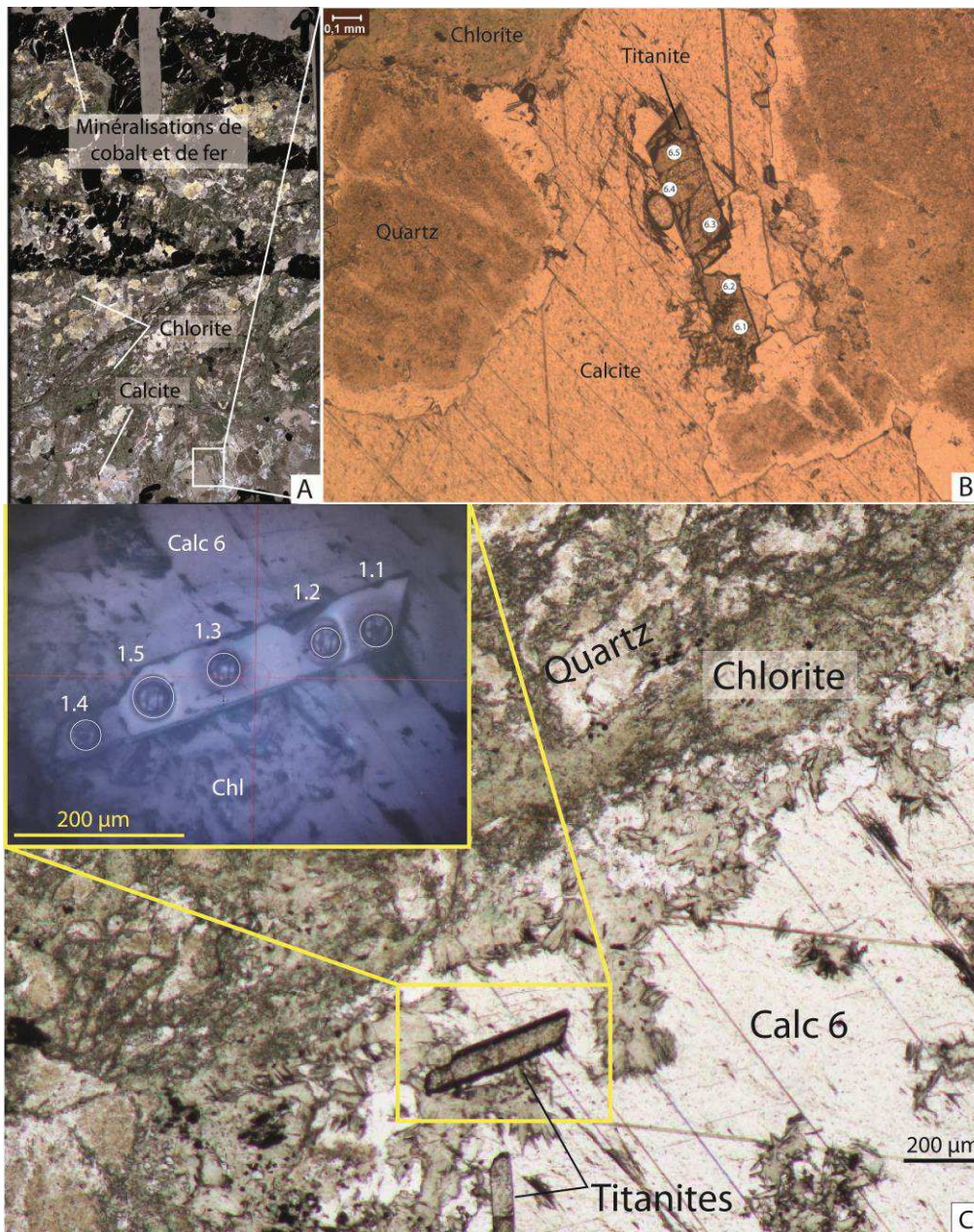


Figure V.7 : A) Vue d'ensemble du contexte d'analyse des titanites de la lame BAE73C1. B) Zoom sur une titanite, les cercles représentent les points d'analyses. C) titanites associées à la calcite (Calc 6) et zoom sur les points d'analyses au LA-ICP-MS (lame BAE73c1) (lumière réfléchie)

## D. Résultats

### 1. Calcite

Afin de déterminer les zones susceptibles d'être enrichies en uranium, en complément des analyses des éléments en trace et des métaux effectuées au LA-ICP-MS de l'ETH de Zurich (méthodologie dans le chap. IV.B.2), les concentrations en  $^{238}\text{U}$ ,  $^{208}\text{Pb}$  et  $^{232}\text{Th}$  supérieures à 1 ppm ont été recherchées. La méthode a été d'analyser de manière aléatoire les échantillons de calcites sélectionnées. Le Tableau V.2 récapitule ces valeurs moyennées selon les générations de carbonate. Malheureusement, les

valeurs en  $^{238}\text{U}$  dans les calcites ne présentent pas de concentrations moyennes très importantes ( $< 0,058$  ppm). Des pics d'uranium ont été néanmoins repérés dans certaines analyses des calcites associées aux poches et aux veines. Les concentrations en  $^{208}\text{Pb}$  sont très élevées par rapport à  $^{238}\text{U}$  ou à  $^{232}\text{Th}$ , montrant l'importance du plomb commun dans les calcites de Bou Azzer (jusqu'à 2.3 ppm en moyenne). Le choix des analyses s'est focalisé sur les calcites provenant des veines.

**Tableau V.2 : Tableau des valeurs moyennes et leur écart-types des données en  $^{238}\text{U}$ , en  $^{208}\text{Pb}$  et  $^{232}\text{Th}$  des calcites de Bou Azzer (lame BAE23).**

Localisation	Lame	Minéral	$^{238}\text{U}$ (ppm)		$^{208}\text{Pb}$ (ppm)		$^{232}\text{Th}$ (ppm)	
			Moyenne	SD	Moyenne	SD	Moyenne	SD
Min. massives	BAE46c	Calc 1	0,058	0,078	2,331	3,583	0,076	0,083
Min. massives	BAE21b	Calc 2.1	0,001	0,001	0,244	0,251	0,004	0,007
Min. massives	BAE63c1	Calc 2.1	0,001	0,001	0,653	0,300	0,003	0,003
Min. massives	BAE21b	Calc 2.2	0,001	0,003	0,634	1,851	0,002	0,005
Min. massives	BAE21b	Calc 2.2	0,002	0,003	0,620	1,504	0,004	0,004
Veines	BA51c	Dol 1	0,002	0,001	0,072	0,131	0,024	0,019
Veines	BAE3	Calc 4.2	0,000	0,000	0,041	0,035	0,000	0,000
Veines	BAE3	Calc 4.2	0,000	0,000	0,246	0,567	0,001	0,000
Veines	BAE23	Calc 4.2	0,030	0,046	1,427	1,850	0,002	0,001
Poches	BAE59a1	Calc 4.1	0,001	2,691	51	280	7,148	10,102
Poches	BAE68e	Calc 4.2	0,001	0,000	0,062	0,104	0,002	0,002
Poches	BAE68f2	Calc 4.2	0,001	0,001	0,393	0,566	0,004	0,003
Poches	BAE68f2	Calc 4.2	0,000	0,000	0,130	0,130	0	-

Le tableau V.3 présente les valeurs permettant le calcul de l'âge U/Pb. Dix-sept spots d'analyses de calcite sont reportés sur le diagramme discordant Tera-Wasserburg (Figure V.8). La composition en plomb commun est de  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 0.8665$ . Les concentrations en  $^{238}\text{U}$ , obtenues suite à l'analyse au LA-ICP-MS, oscillent entre 0,003 et 8,27 ppm ; tandis que les teneurs en  $^{206}\text{Pb}$  atteignent 11 ppm. La proportion en plomb commun est très importante. Le rapport  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  est entre 0.83-0.88 (Tableau V.3). L'âge obtenu d'après ces données est de  $34.4 \pm 13.32$  Ma ( $2\sigma$ ) avec un MSWD à 3.5 (Figure V.8).

**Tableau V.3 : Résultats U/Pb obtenus sur les calcites de l'échantillon BAE23 d'une veine de Bou Azzer**

Echantillon	Zone	$^{238}\text{U}$ (ppm)	$^{206}\text{Pb}$ (ppm)	$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$	PropErr2sig%	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	PropErr2sig%
BAE23	Carb_1	0,00437	4	0,007	29,252	0,873	1,145
BAE23	Carb_2	0,0245	0,77	0,293	28,739	0,885	2,147
BAE23	Carb_4	0,00352	2,4	0,011	15,909	0,873	1,489
BAE23	Carb_5	0,052	2,039	0,234	9,133	0,87	1,264

BAE23	Carb_7	0,251	3,845	0,42	20,588	0,867	1,153
BAE23	Carb_8	0,0148	8,27	0,011	21,088	0,863	1,008
BAE23	Carb_9	0,0949	9,08	0,066	10,568	0,871	0,861
BAE23	Carb_11	0,0214	4,8	0,03	20,303	0,881	1,135
BAE23	Carb_12	0,0384	1,657	0,153	11,621	0,839	1,43
BAE23	Carb_13	0,0387	4,223	0,102	11,19	0,853	1,407
BAE23	Carb_14	0,00748	3,766	0,022	11,894	0,857	1,634
BAE23	Carb_15	1,636	2,804	6,601	8,581	0,838	2,148
BAE23	Carb_16	0,706	2,968	2,74	8,767	0,842	1,9
BAE23	Carb_17	0,328	5,87	0,66	8,581	0,859	2,678
BAE23	Carb_18	2,11	11,5	1,582	237,342	0,848	1,415
BAE23	Carb_19	8,27	10,1	5,76	14,401	0,844	0,995
BAE23	Carb_20	2,284	5,568	0,457	8,219	0,855	0,935

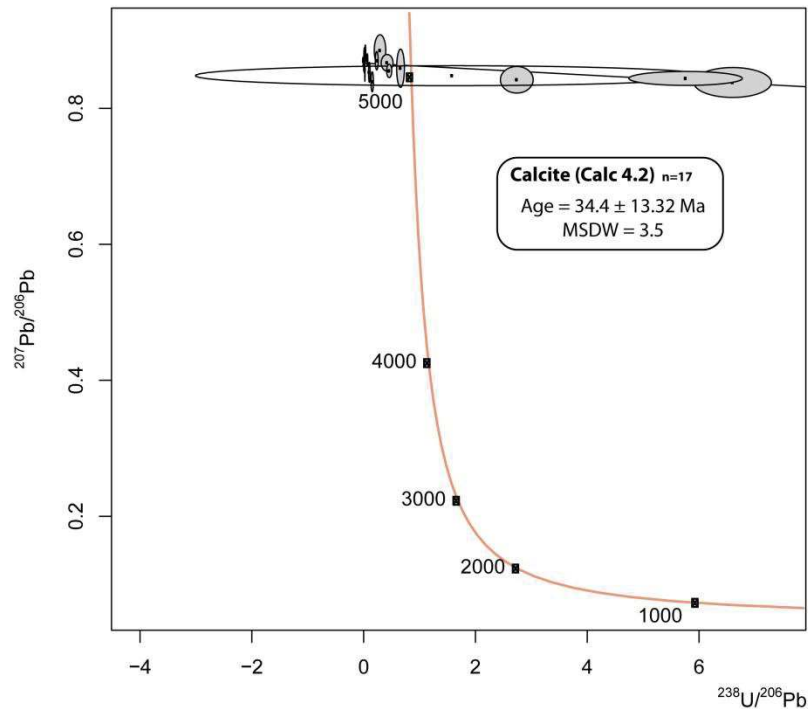


Figure V.8 : Diagramme Tera-Wasserburg discordant pour les calcites des veines de Bou Azzer

## 2. Apatites

Parmi les 12 apatites, 13 analyses ont été effectuées dans les zones altérées de bordure et 10 analyses aux cœurs des apatites (Tableau V.4). Les concentrations en  $^{238}\text{U}$  ne sont pas élevées, elles oscillent entre 0.048 et 1.9 ppm d'uranium. Les concentrations en  $^{206}\text{Pb}$  sont inférieures à 1 ppm (Tableau V.4). Afin de calculer l'âge des apatites, deux étapes ont été suivies. Les âges obtenus dans les cœurs et dans les bordures ont été séparés. Après avoir rentré dans le logiciel les rapports isotopiques ( $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  versus  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ), une première datation est obtenue à  $775.3 \pm 63.4 \text{ Ma}$  ( $2\sigma$ )

dans les cœurs et à  $762.5 \pm 109.7$  Ma ( $2\sigma$ ) dans les bordures. Or les analyses montrent un grand étalement en termes de composition de plomb commun et de grandes marges d'erreurs. La discordia construite à partir du logiciel Isoplot/R se voit forcer le rapport  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  calculé à partir du premier âge des apatites obtenus à 775 Ma. Le rapport  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  calculé est de 0,894. Une fois appliqué et forcé, la discordia donne alors un âge de  $787.2 \pm 35.4$  Ma ( $2\sigma$ ) dans les cœurs des apatites avec un MSWD à 8.5 (Figure V.9A) ; et un âge de  $680.7 \pm 42.8$  Ma ( $2\sigma$ ) pour les bordures, avec un MSWD à 5.2 (Figure V.9B). Malgré le faible rapport  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  variant entre 0,1 et 0,7 ; les erreurs à 2 sigma sont parfois très importantes. Les apatites analysées présentaient de petites tailles inférieures à  $100\mu\text{m}$ , et le diamètre du spot d'analyse était à  $20\mu\text{m}$ .

**Tableau V.4 : Concentration en U-Pb et leurs rapports isotopiques des apatites analysées à Bou Azzer Puit 3 et à l'Axe Millon**

Echantillon	Zone	$^{238}\text{U}$ (ppm)	$^{206}\text{Pb}$ (ppm)	$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$	PropErr2sig%	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	PropErr2sig%
BAE73C1_1	Cœur	1,9	0,45	8,764	8,414	0,135	8,148
BAE73C1_4.2	Cœur	0,086	0,19	2,618	7,592	0,654	7,187
BAE73C1_4.5	Cœur	0,1	0,17	5,291	42,857	0,382	8,377
BAE73C1_4.6	Cœur	0,053	0,11	4,386	8,772	0,436	11,927
BA8B_5	Cœur	1,4	0,25	6,369	12,739	0,261	9,579
BA8B_7	Cœur	0,095	0,36	3,195	10,863	0,656	9,451
BA8B_8	Cœur	0,075	0,52	2,865	9,456	0,605	10,248
BA8B_9	Cœur	0,21	0,99	5,155	12,887	0,434	7,834
BA8B_10.1	Cœur	0,076	0,94	3,215	7,717	0,398	8,04
BA8B_10.2	Cœur	0,35	0,32	5,556	8,333	0,241	14,523
BA8B_11.1	Cœur	0,052	0,18	2,778	8,611	0,602	8,14
BA8B_11.2	Cœur	0,051	0,16	2,198	9,67	0,697	7,317
BA8B_12	Cœur	0,34	0,83	3,953	19,368	0,361	13,296
BA8B_4.1	Bordure	0,069	0,098	2,309	21,247	0,7	20,00
BA8B_4.3	Bordure	0,057	0,064	2,907	16,57	0,466	14,807
BA8B_4.7	Bordure	0,061	0,11	5,525	8,287	0,331	11,782
BA8B_6.1	Bordure	0,048	0,14	3,774	12,83	0,623	9,791
BA8B_10.3	Bordure	0,28	0,68	4,854	17,476	0,339	25,369
BA8B_11.3	Bordure	0,089	0,4	4,098	9,016	0,569	7,206
BA8B_11.4	Bordure	0,22	0,23	4,348	7,826	0,476	7,353
BAE73C1_2	Bordure	0,13	0,26	3,3	21,782	0,72	10,556
BAE73C1_3	Bordure	0,067	0,087	4,082	204,082	0,48	33,333
BAE73C1_6.2	Bordure	0,12	0,17	5,848	9,942	0,424	9,67

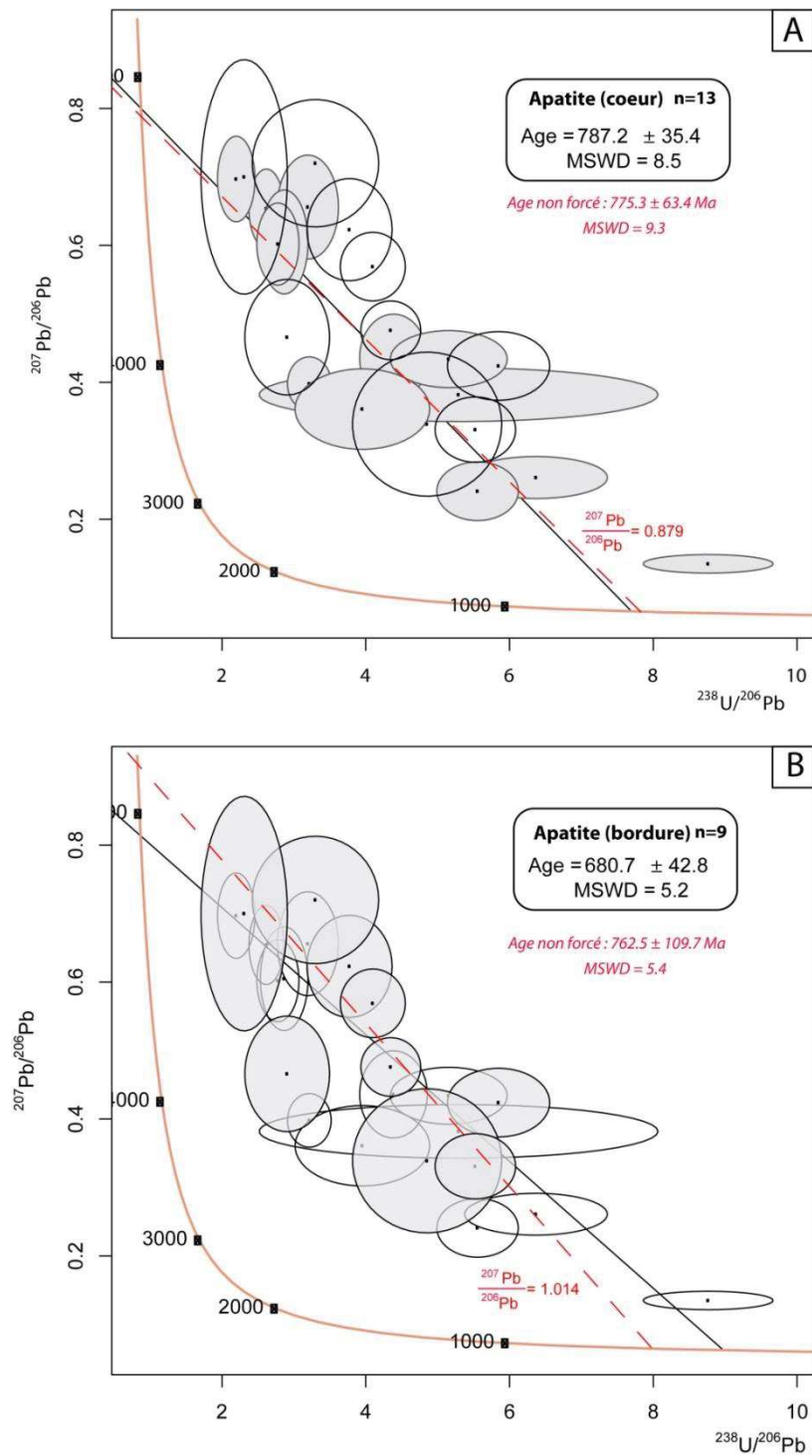


Figure V.9 : A) Discordia Tera-Wasserburg avec la date corrigée en plomb commun ( $^{207}\text{Pb}$ ) définie avec 13 analyses aux cœurs des apatites. B) Discordia Tera-Wasserburg définie avec 10 analyses des bordures des apatites (ligne rouge : date non forcée, rond grisé : analyse utilisée pour le calcul de l'âge)

### 3. Titanites

Parmi les 10 titanites, 11 analyses ont été effectués dans les cœurs des titanites et 3 en bordure en bordure (Tableau V.5). Le choix a été de ne pas séparer les points d'analyses entre le cœur et la bordure dans les titanites afin de calculer au mieux l'âge des minéraux sélectionnés. Les concentrations en uranium ne sont pas élevées, elles oscillent entre 4 et 14 ppm d'uranium. Les concentrations en plomb sont inférieures à 1 ppm. Afin de calculer l'âge des titanites, deux étapes ont également été suivies. Tout d'abord, les rapports isotopiques ( $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  versus  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ) sont reportés dans le logiciel Isoplot/R avec leurs erreurs à 2 sigmas associées. Une première datation est obtenue à  $369.4 \pm 5.3$  Ma. La discordia plotée sur le logiciel Isoplot/R se voit forcer sa composition en plomb commun en utilisant l'âge de 369.4 Ma. Le rapport  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  calculé est de 0,858. Une fois appliqué, la discordia donne un âge de  $365.9 \pm 7.1$  Ma ( $2\sigma$ ), avec un MSWD à 2.0 (Figure V.10).

Tableau V.5 : Concentration en U-Pb et leurs rapports isotopiques des titanites analysées à *Bou Azzer Puit 3*

Echantillon	Zone	$^{238}\text{U}$ (ppm)	$^{206}\text{Pb}$ (ppm)	$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$	PropErr2sig%	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	PropErr2sig%
BAE73C1-1.2	Cœur	4	0,05	16,807	5,378	0,087	50,575
BAE73C1-2.2	Cœur	14	0,65	15,949	3,987	0,113	7,326
BAE73C1-3.2	Cœur	5	0,07	17,007	4,422	0,081	17,284
BAE73C1-5.2	Cœur	5	0,26	16,207	4,7	0,169	11,834
BAE73C1-5.3	Cœur	6	0,13	16,234	4,87	0,099	15,152
BAE73C1-6.1	Cœur	11	0,06	16,835	3,535	0,056	11,131
BAE73C1-6.3	Cœur	10	0,07	16,34	3,758	0,067	10,682
BAE73C1-7.1	Cœur	8	0,27	16,447	4,112	0,094	10,15
BAE73C1-8.1	Cœur	3	0,33	13,717	5,213	0,205	12,195
BAE73B2-9.1	Cœur	14	0,20	16,863	3,541	0,06	7,616
BAE73b2-9.2	Cœur	3	0,55	12,469	6,359	0,33	30,303
BAE73C1-2.1	Bordure	8	0,06	17,271	4,491	0,072	23,743
BAE73C1-3.1	Bordure	12	0,05	16,393	3,279	0,063	6,55



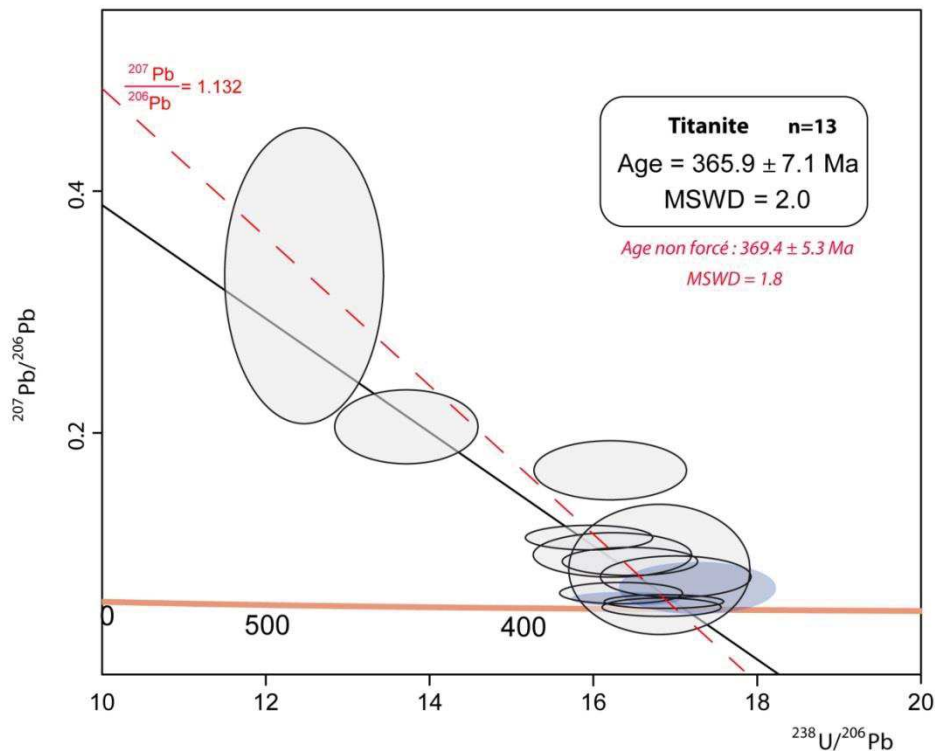


Figure V.10 : Discordia Tera-Wasserburg définie avec 13 analyses de grains de titanite de l'échantillon BAE73C1. (Rond noir : analyse au cœur de la titanite; Rond bleu : analyse en bordure de la titanite)

#### Ce qu'il faut retenir :

L'étude géochronologique effectuée dans les minéraux de calcite, d'apatite et de titanite, nous donne un message différent selon leur position par rapport aux minéralisations de Bou Azzer. Les trois âges obtenus expriment différents événements géologiques qui ont affectés le gisement et la boutonnière de Bou Azzer. À ce stade, nous ne parlerons pas encore d'âge mais de datation car le degré de cohérence des datations est trop élevé par rapport à la valeur du MSWD défini par Wendt & Carl (1991) pour que nos résultats soient jugés fiables. Les calcites analysées sont associées au stade à arsénifères de fer des veines. Elles donnent un âge très jeune à 34 Ma qui est ininterprétable. Cependant, il est important de préciser que le MSWD est à 3,5 et la présence importante de plomb commun. Cet âge est donc à considérer avec précaution car il pourrait être rajeuni par la présence du plomb commun. Les apatites sont soit disséminées dans la diorite ou associées à de la chlorite et de la loellingite dans des microfractures parallèles à la foliation de la diorite. Les apatites donnent des âges très vieux entre 787 au cœur et 680 Ma en bordure. Cependant, le MSWD est nettement supérieur à la limite exprimé par Wendt & Carl (1991) : 5.2 pour la datation en bordure et 8.5 pour la datation au cœur. Les titanites, associées à de la calcite et de la chlorite affectent la diorite quartzique et indiquent un âge Dévonien à 365 Ma avec un MSWD à 2.

## **Chapitre VI : Le gisement de Bou Azzer - Résultats principaux, discussion et conclusions**



## A. Résultats principaux

Cette première partie de la discussion est un rappel des principaux résultats obtenus lors de l'étude pétro-structurale et minéralogique, de l'étude des inclusions fluides, géochimiques et géochronologique des structures. Cette synthèse permettra d'appuyer la discussion à la fois sur le modèle de formation du gisement, sur sa classification et sur l'origine des fluides minéralisateurs. Le tableau paragenétique ci-dessous permet de résumer l'ensemble des résultats obtenus (Figure VI.1).

Minéralisations	Les minéralisations massives	Les veines et les poches	Stade supergène
Serpentine	██████████		?
Talc	██████████		
Nickeline	Nik1 ██████████	Nik2 ██████████	
Rammelsbergite	Ram ██████████		
Cobaltite	Cob1 ██████████	Cob2 ██████████	Cob3 ██████████
Skuttérodite	Sk1 ██████████ Sk2 ██████████	Sk3 ██████████	
Calcite	Calc1 ██████████	Calc2 ██████████	Calc3 ██████████
Loellingite	Loel1 ██████████	Loel2 ██████████	
Safflorite	Saff1 ██████████	Saff2 ██████████	
Quartz	Qtz1 ██████████	Qtz2 ██████████	Qtz3 ██████████
Chlorite	Chl1 ██████████	Chl2 ██████████	Chl3 ██████████
Gersdorphite	Gd ██████████		
Sphalérite	Sp1 ██████████	Sp2 ██████████	
Galène	Gl ██████████		
Arsénopyrite	Asp1 ██████████	Asp2 ██████████	
Chalcopyrite	Cp1 ██████████	Cp2 ██████████	
Dolomite		Dol1 ██████████	
TN-TD		Fa ██████████	
Bornite		Bo ██████████	
Adulaire		Adu ██████████	
Erythrine			Ert ██████████
Titanite			Tit ██████████
<b>Texture</b>			
Co-Ni Arsenide automorphe	Arséniures de Ni-Co-Fe ██████████		
Remplacement		Calc2 ██████████	
Quartz automorphe		Qtz 2 ██████████	
Carbonate automorphe		Calc3 ██████████	Calc4 ██████████
<b>Proportions des Éléments</b>			
Co	██████████	██████████	██████████
Ni	██████████	██████████	██████████
Fe	██████████	██████████	██████████
As	██████████	██████████	██████████
S	██████████	██████████	██████████

Figure VI.1 : Tableau paragenétique synthétique des minéralisations de Bou Azzer

## 1. Modèle pétro-structural des minéralisations de Bou Azzer

Ce travail de recherche a permis d'élaborer précisément le modèle de formation des minéralisations de Bou Azzer en prenant en compte les aspects structuraux, texturaux et minéralogiques. Les principaux résultats de notre étude sont :

### 1. Nous confirmons l'existence de trois types de minéralisation à Bou Azzer.

i) **Les minéralisations massives** représentent des dépôts contenant du Ni et du Co. Les corps sont massifs, métalliques, sous forme de lentilles de taille plurimétriques avec une orientation N120°E. Les minéralisations massives principalement enrichies en skuttérodite sont réparties le long du contact entre la serpentinite, la diorite quartzique et les roches volcaniques précambriennes.

ii) **Le système de veines** est contrôlé par des failles uniquement minéralisées en arséniures de Co et de Fe. Les minéralisations de type veine ont des orientations variables entre NS à N070°E et recoupent les unités lithologiques de la boutonnière de Bou Azzer, sauf la formation de l'Adoudounien. Les veines sont associées à des mouvements sénestres ou dextres selon leurs orientations et d'un mouvement normal systématiquement observé dans le plan vertical. Ainsi, et en accord avec les caractéristiques texturales, elles montrent un mode de formation associé à un contexte transtensif. A ce stade, ceci traduit l'existence d'un fort contrôle tectonique lors de la formation de veines, certainement avec une direction de raccourcissement orientée N°30°E. Les veines recoupant les roches de la boutonnière, sont particulièrement bien formées lorsqu'elles recoupent la diorite quartzique, et disparaissent ou se transforment en micro-fractures dans la serpentinite (Figure II.41C). Les veines sont minéralisées uniquement lorsqu'elles recoupent les minéralisations massives en contact avec la serpentinite. Elles sont principalement composées par les minéraux de cobaltite et de skutterudite.

iii) **La formation de poches décimétriques** au cœur des minéralisations massives est synchrone de la phase tectonique associée à la formation des veines. Ces poches sont caractérisées par la formation de quartz en peigne, d'arséniures de Co et de Fe et de calcite rhomboédrique qui constituent la majorité de la structure.

### 2. La minéralogie des trois types de minéralisation (minéralisation massive, veine, poche) montre la même paragenèse minérale allant du stade à Co, à Fe et au stade à S, seul celui à Ni diffère. Texturalement, les gangues carbonatées montrent des textures bréchiques et automorphes (Figures II.36A, B et E) et les gangues siliceuses ont une texture en peigne ou en mosaïque (Figures II.39E). Le premier stade minéralisateur est le stade à Ni, décrit par la formation d'arséniures de Ni (Nik 1 et Ram) associés à de la skuttérodite (Skut 1) et de la

cobaltite (Cob 1) au sein des minéralisations massives dans une gangue de serpentinite bréchifiée et/ou laminée (Figure II.41). Le second stade est un stade à Co qui se met en place avec l'arrivée massive de skutterudite (Skut 2) et de safflorite (Saf1 1). Des textures tardives synchrones entre calcite (Calc 2.1) et skutterudite (Skut 2) (Figure II.17C) indiquent le début de la carbonatation de la gangue de serpentinite. Ensuite, la gangue carbonatée (Calc 2.2) se forme massivement autour de l'ensemble des minéralisations massives déjà formées, et s'accompagne du stade à Fe par la formation de la loellingite (Loel 1). La Loel 1 décrit également des textures d'épitaixie sur les bordures des safflorites (Saf1 1) (Figure II.18A) ce qui s'explique par des formules structurales proches facilitant la substitution entre le Fe et le Co. Enfin, le stade à sulfure est marqué par la mise en place de l'arsénopyrite et de sulfures à métaux de base (chalcopryrite, sphalérite, galène) en fin de formation de la gangue carbonatée (Calc 2.2). Les minéralisations formées au sein des veines et des poches débutent par la mise en place de quartz (Qtz 2) au bord de la veine, dolomite (Dol 1) et de la calcite (Calc 3) en son centre. Le stade à Co est mis en évidence par la skutterudite (Skut 3) associée au quartz en peigne (Qtz 2) et la safflorite (Saf1 2). Le stade à Fe est exprimé par la formation de la loellingite (Loel 2) mise en place autour de brèches de diorite, sur les bordures de la safflorite et associée à la calcite (Calc 4.1). La cobaltite, l'arsénopyrite, la chalcopryrite et la sphalérite sont des sulfo-arséniures et des sulfures mis en place pendant la formation de la gangue carbonatée (Calc 4.2). Des veines tardives recoupant la diorite quartzique stériles en minéralisation sont composées de quartz (Qtz 4) et de calcite (Calc 5) et d'adulaire (Adu) formé en épitaixie sur les bords des albites composant la diorite quartzique.

3. Nous confirmons également une évolution paragénetique des minéralisations évoluant de fluides riches en Ni-(Co-Fe) à des fluides riches en Co-(Ni-Fe) depuis les minéralisations massives jusqu'aux poches et au système de veines. Étant donné que cette évolution se retrouve dans les trois systèmes, que ce soit minéralogique ou texturale, nous proposons une continuité entre les processus responsables de la formation des minéralisations massives et des veines de Bou Azzer. Ces minéralisations sont encaissées dans les mêmes types de gangues de quartz et de carbonates. Cette évolution a également été observée par Ennaciri et al. (1997), Dolansky (2007), Ahmed et al. (2009) ou encore Gervilla et al. (2012).
4. La texture de la gangue carbonatée traduit le fait que ces lentilles minéralisées sont certainement d'anciens corps bréchiques composés de nombreux fragments résiduels de serpentinite qui ont été observés à la surface, en galerie et également à l'échelle microscopique. La serpentinite se présente également sous forme de veines et de fibres et fracture la rammelsbergite et la skutterudite (Figures II.36B, C et H). Cela montre clairement

que le processus de serpentinitisation persiste au moins pendant les premiers stades de la formation de la gangue et de la minéralisation. Deux types de textures sont également observés au sein de la gangue des minéralisations massives : une texture bréchique de fragments de rammelsbergites lamellaires isolés et entourés de minéralisations de Co (Brecciated Massive Mineralisation, BMM) et une texture laminée de niveaux alternant entre de la nickeline et de la gangue carbonatée (Laminated Massive Mineralisation, LMM). Ces textures démontrent un mode de mise en place précoce du contact minéralisé dans un environnement tectonique composé d'ophicalcite. Nous confirmons, également, la présence de reliques de spinelles au sein de la serpentinite, de la gangue carbonatée, et associées aux arséniures (rammelsbergite, skuttérudite, loellingite) également décrit par Gervilla et al. (2012) et Fanlo et al. (2015). L'importance des spinelles comme source des métaux et précurseurs à la formation des minéralisations de Bou Azzer sera discutée par la suite.

5. Les deux principales unités qui forment les roches encaissantes, à savoir la serpentinite et la diorite de quartz, sont affectées par des processus d'altération :

- i) la *serpentinite* est affectée par une forte altération carbonatée. Certains auteurs évoque le terme de liswénite concernant les serpentinites carbonatées de Bou Azzer (e.g. Mouttaqi et al., 2011 ; Maacha et al., 2012 ; Bhilisse et al., 2014 ; Maacha et al., 2015). Nous observons une plus forte altération carbonatée dans les zones où la serpentinite ne se trouve pas en contact avec les minéralisations massives. Les spinelles composant la serpentinite voient également leurs bordures altérées en magnétite, processus caractéristique de la serpentinitisation.

- ii) La *diorite quartzique* présente une épidotisation sous forme de veinules à proximité des veines minéralisées de Bou Azzer (Figure II.11D). Cette altération en épidote a été attribuée à certains effets de haute température, certainement contemporains de la mise en place et du refroidissement de la diorite. De plus, la dissémination de minéraux métalliques, spécifiquement de la loellingite, proche des veines, est associée à une chloritisation et une micro-fracturation observée à l'échelle microscopique. Cet arséniure de Fe est fracturé par des veines de feldspath potassique (Figure II.36A). La formation du feldspath potassique dans la diorite de quartz est supposée être synchrone à la formation de veines. Une altération mal définie décrite par une carbonatation de la diorite accompagnée de titanite et de chlorite est observée dans la diorite mais n'est pas reliée à l'histoire du gisement.

## 2. Étude des inclusions fluides

**Pétrographie des inclusions fluides.** L'étude pétrographique des inclusions fluides s'est basée sur l'évolution paragenétique établie. Les principaux résultats obtenus sont en accord avec la relation étroite des deux différents types de structures de Bou Azzer. Les résultats principaux sont énoncés ci-dessous :

- Les mêmes types d'inclusions fluides ont été observés dans les trois types de structures exploités à Bou Azzer : i) les LVS composées de liquide, d'une bulle de vapeur et d'un cube de halite, sont riches en éléments traces et en métaux (Chap. III), ii) les VL composées d'un liquide contenant une bulle de vapeur dominante, iii) les inclusions monophasées en phase vapeur (V), iv) l'association d'inclusions solides de halite enrichi en Pb et Sr et d'inclusions monophasées de vapeur et v) des inclusions minérales composées d'assemblages de Mg, Fe, Si et Mn (Figures III.21 et III.22). Ces inclusions dites solides sont situées au niveau de la surface ou à l'intérieur de l'inclusion fluide. D'après l'évolution paragenétique, les inclusions fluides étudiées dans la gangue carbonatée des minéralisations massives sont celles qui se trouvent le plus proche du principal stade minéralisateur en Co, qui est l'objet principal de cette étude.
- Les parties « vapeur » des IFs LVS, VL et V comprises dans la gangue carbonatée des minéralisations massive sont composées de méthane (CH<sub>4</sub>) (Annexe III.1A et III.2).
- Le phénomène d'ébullition est marqué par l'association d'inclusions fluides salines (LVS) avec des inclusions monophasées de vapeur et biphasées composées d'un liquide et d'une bulle de vapeur dominante. Ce phénomène a été caractérisé dans tous les minéraux de la gangue.

**Pression/température/salinité.** D'après la paragenèse décrite et la distribution des résultats des IF (Figure VI.2), la température diminue légèrement en passant des minéralisations massives, aux veines et aux poches. La salinité en eq. NaCl diminue des minéralisations massives aux systèmes des veines et des poches de 10 et 35 %pds NaCl eq. (Figure VI.2). Les rapports entre Na/Ca dans les inclusions fluides incluses dans les quartz sont à 0.4; ce qui nous permet d'affirmer que les inclusions fluides ont été piégées dans un système H<sub>2</sub>O-NaCl-CaCl<sub>2</sub>. Les teneurs en CaCl<sub>2</sub> augmentent dans les inclusions fluides selon l'évolution paragenétique des minéralisations.



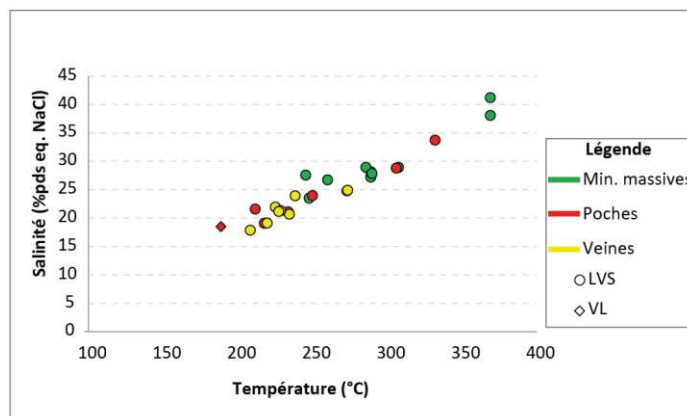


Figure VI.2 : Diagramme représentant la température d'homogénéisation, les salinités des assemblages d'inclusion fluide de cette étude (données microthermométrique)

Les pressions et températures des fluides de Bou Azzer sont rappelées dans la Figure VI.3, montrant des variations très importantes i) de pression (minimale) de formation entre 4 bars et 43 bars et ii) de température (minimale) de piégeage du fluide entre de l'ordre de 150 et 350°C. Un problème se pose quant à l'hétérogénéité du piégeage des inclusions fluides au travers d'association d'inclusions riches en saumures (LVS), d'inclusions monophasées en vapeur, d'inclusions fluides biphasées (LVVL et d'inclusions sursaturées en halite.

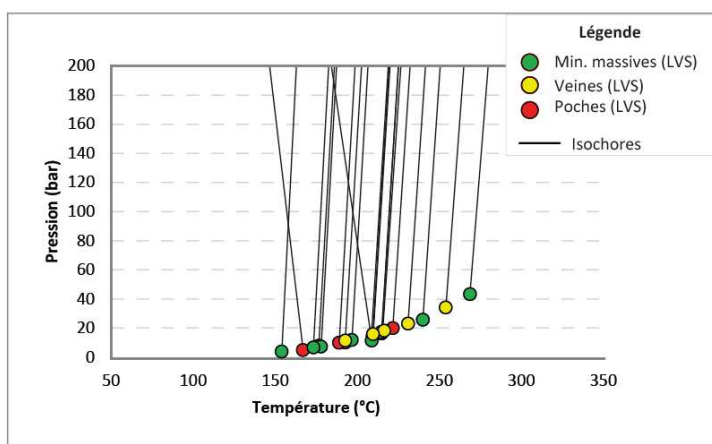


Figure VI.3 : Diagramme de pression/température des données de fluide de Bou Azzer

**Analyse géochimique.** L'ensemble des inclusions sont enrichies en éléments traces : Ca, Na, K, B, Li, Ba, B, Cl et Sr et en métaux : Co, Ni, Fe, Zn, Pb, Cu, S, Ag et As (Annexe III.3). L'analyse au laser LA-ICP-MS montre que les teneurs en éléments traces et en métaux dans les inclusions fluides diminuent progressivement des minéralisations massives jusqu'aux veines et aux poches. Un pic d'enrichissement à partir de la formation des veines et des poches est systématiquement observé. Cependant, les teneurs anormalement élevées en métaux de base (Zn, Pb, Cu) sont présentes des minéralisations massives aux structures extensives. Le fluide porte une signature particulière marqué par la relation entre le Li vs B, Na vs K, Ni vs Co et vs Fe.

### 3. Étude géochimique des métaux et de la gangue encaissante

**Les arséniures** analysés dans les trois types de structures sont tous enrichis en Bi, Cu, Sb, Ge et Ag. La rammelsbergite est enrichie en Co et Au; la cobaltite en Au et la skuttérodite en S et Ni. **Les sulfures** analysés (arsénoopyrite, sphalérite et chalcoppyrite) associés au stade tardif des minéralisations massives montrent un enrichissement en Ge, en Cu et en Ag. Il faut aussi noter que les concentrations en métaux augmentent graduellement en passant de la serpentinite, aux minéralisations massives, aux veines et aux poches, ce qui est cohérent avec la chronologie de la séquence paragenétique.

**Les inclusions solides.** Les arséniures, les sulfo-arséniures et les sulfures formés à Bou Azzer présentent globalement un enrichissement en Sb, Cu, Bi, Pb, Au, Ag et Ge dans les inclusions de halite des trois types de structures de Bou Azzer. Les concentrations varient entre 10 et 250 ppm en Sb, 5 à 1300 ppm en Bi, 8 à 600 ppm en Cu, 1 à 30 ppm en Pb, 9 à 170 ppm en Ge et jusqu'à 70 ppm en Ag et 10 ppm en Au (Annexe IV.1 et IV.2). L'enrichissement remarqué en Bi et en Pb (Figure VI.4) coïncide avec des inclusions à assemblage de Bi-Al, de Pb-Bi-S ou de Bi natif dans les arséniures (Figure VI.4A et VI.5B) et dans les sulfures (Figure VI.4C).

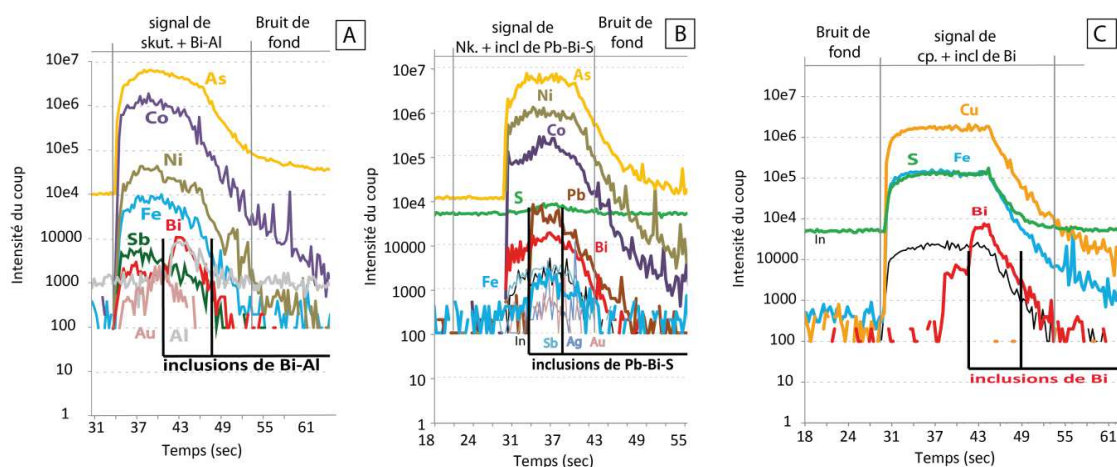


Figure VI.4 : Signaux d'ablation laser de la A) skuttérodite, B) la nickeline et de C) la chalcoppyrite, indiquant des inclusions de Bi natif (A et C) et d'assemblage de Bi et d'Al

**Les calcites.** Les résultats principaux concernant les calcites analysées dans les structures sont les suivants : i) les calcites sont enrichies en métaux tels que le Co, Ni, Zn, Cu, Pb et Ag et ii) les calcites des trois structures sont également enrichies en Li, B, V, Cr, Sr et Ba. La signature en terres rares (TR) est la même dans les structures sauf dans les veines tardives stériles (Qtz3 et Calc 5). Les calcites des trois structures ont la même signature en Li vs B, Zn vs Pb, V vs Cr et Ni vs Co. L'analyse des spectres de TR indique des signatures particulières dans les différentes générations de calcites associées aux trois types de structures de Bou Azzer. Le résultat majeur de cette étude montre que les spectres des calcites des minéralisations massives et des veines montrent des similitudes,

contrairement aux spectres des calcites issus des poches et des veines stériles (Calc 5) en minéralisations.

**Les spinelles.** Les spinelles observés au sein des serpentinites sont des spinelles chromifères formés dans le manteau. Ces spinelles ont subi une déstabilisation marquée par la formation de magnétite en bordure du minéral, lors de la serpentinitisation (Figure II.39A). Les spinelles inclus dans la gangue carbonatée des minéralisations massives et dans la gangue des poches ont été décrits comme des reliques du manteau serpentinitisé (Annexe II.4). Les résultats majeurs des données obtenues dans les spinelles sont les suivants : i) les spinelles montrent des teneurs importantes en Zn, Pb, Bi et Cu comme observées dans les arséniures et les sulfures ; et ii) le fluide et les calcites donnent la même signature que les spinelles, c'est-à-dire un enrichissement équivalent et des corrélations positives entre Li vs B et Na vs K.

#### 4. Géochronologie

L'étude géochronologique effectuée dans les minéraux de calcite, d'apatite et de titanite, nous donne des informations différentes selon leur position par rapport aux minéralisations de Bou Azzer. Les trois âges obtenus correspondent à différents événements géologiques ayant affecté les gisements et la boutonnière de Bou Azzer. Cependant, les datations ne sont pas utilisables car la valeur du MSWD défini par Wendt & Carl (1991) pour nos datations est élevée, ainsi les âges obtenus ne peuvent pas être considérés comme fiables. La datation des titanites possède des MSWD moins élevés qui permettent de considérer ces âges.

i) Les calcites analysées (Calc 4) sont associées au stade à arséniures de Fe des veines. Elles donnent un âge très jeune à 34 Ma. Cependant, il est important de préciser que le MSWD est de 3,5 et la présence importante de Pb commun. Cette datation n'est pas utilisable car elle est certainement très rajeunie en lien avec une forte concentration en Pb commun.

ii) Les apatites sont disséminées dans la diorite, ou associées à la chlorite et la loellingite dans des microfractures parallèles à la foliation de la diorite. Les apatites donnent des âges variables de 787 Ma au cœur et 680 Ma en bordure. Cependant, le MSWD est nettement supérieur à la limite exprimé par Wendt & Carl (1991) : 5.2 pour la datation en bordure et 8.5 pour la datation au cœur du minéral. Encore une fois, l'utilisation des âges obtenus reste difficile.

iii) Les titanites (tit), associées à de la calcite (Calc 6) et de la chlorite (Chl 3) affectant la diorite quartzique, indiquent un âge Dévonien (365 Ma) avec un MSWD de 2.

## B. Modèle de formation et de mise en place du gisement de Bou Azzer

Un modèle de mise en place des minéralisations est ici proposé en complément de celui qui est représenté par la figure II.41. Ce dernier est donné dans le plan horizontal alors que celui de la figure VI.5 montre ce qui se passe dans le plan vertical. Les informations recueillies lors de ce projet de thèse telles que la circulation du fluide, l'enrichissement du fluide et la formation des minéralisations ont été représentées sur ce modèle de mise en place du gisement de Bou Azzer. Les flèches indiquent la circulation du fluide. Trois codes de couleur ont été utilisés :

- Lorsqu'elles sont bleues, le fluide composé des éléments est déterminé comme sortant du système ou lessivé et emporté dans le fluide. Les éléments sont considérés comme restant dans le fluide. Ils ne cristallisent pas à ce stade et peuvent alors alimenter les minéraux autour.
- Les flèches blanches représentent les éléments métalliques qui restent « dans le système » par le lessivage « in-situ » des minéraux et roches déjà présentes. Il est appelé fluide minéralisateur.
- Les flèches rouges décrivent le transport de fluides enrichis en éléments entrant dans le système.

Deux échelles d'observation sont représentées : les observations à l'échelle de l'affleurement et deux zooms à l'échelle de la lame mince afin de se concentrer sur les points importants liés aux circulations de fluides. Les deux zooms à l'échelle de la lame mince concernent les observations des deux types de textures précédemment observés dans le contact entre la serpentinite, la diorite quartzique et les roches volcaniques, à savoir, la texture Bréchifiée des Minéralisations Massives (BMM) et la texture Laminée des Minéralisations Massives (LMM). Cinq stades ont été représentés :

- A. Le stade A correspond à l'environnement défini comme primaire de la mise en place des structures de Bou Azzer. Cet environnement est le manteau de composition harzburgitique défini par Leblanc & Lbouabi (1988), Ahmed et al. (2005), et Inglis et al. (2005). La roche de nature péridotitique est composée d'olivines, d'orthopyroxènes, de clinopyroxènes et de spinelles. Elle peut contenir des sulfures de Fe et de Ni (Gehlen, 1992 ; Bataleva et al., 2018). Les spinelles représentent le point de départ à la formation des minéralisations de Bou Azzer. Ils peuvent apparaître selon trois formes distinctes : i) disséminés, ii) le long de lits stratifiés et iii) en lentilles (Thayer, 1964, 1969 ; Dickey, 1975 ; Bhillise et al., 2014). Les olivines, les pyroxènes, les spinelles et les sulfures présents au sein du manteau sont enrichis en métaux tels que Co, Zn, Ni, Ag, Cu ou Pb (Figure VI.5A).
- B. Le stade B présente l'état du manteau après sa serpentinitisation en lizardite/chrysotile (Annexe II.3 ; Alansari et al., 2015 ; Hodel et al., 2017). Lors du métasomatisme du manteau par des

fluides dérivant de la plaque plongeante (contexte de subduction) ou sous les effets de l'eau de mer (sous une croûte océanique), l'hydratation du manteau et sa serpentinitisation se réalisent. L'impact de la serpentinitisation permet la remobilisation des éléments concentrés dans les olivines, les sulfures, les lentilles de chromites et les spinelles notamment. Les spinelles sont affectés par la serpentinitisation. La libération du Fe des olivines est associée à la formation des magnétites qui peuvent se retrouver soit en lits continus (observées sur le terrain, Figures VI.5B1 et 2) ou plus fréquemment en bordure des spinelles (Figure VI.5B3). Rappelons aussi que le manteau serpentinitisé peut contenir des cristaux de halites au niveau des bordures de grains (Scribano et al., 2017). A ce stade, une température peut être estimée entre 300 et 500 °C car seuls la lizardite et le chrysotile peuvent se former dans ces conditions et être stable lors du métasomatisme du manteau (Mével, 2003). A la fin du stade B, l'exhumation du manteau serpentinitisé lors de l'amincissement de la croûte en contexte d'hyper-extension se réalise et ce processus forme alors les contacts entre serpentinite et diorite quartzique / roches Précambriennes volcaniques, tels qu'observés à ce jour. A ce stade, l'origine de l'As est encore mal contrainte. Les fluides métasomatiques issus de la plaque plongeante peuvent être enrichis en As et en S contenus dans les sédiments subductés (Norr et al., 1996). L'origine de l'As peut aussi provenir des apatites présentes dans la diorite quartzique (Baur & Onishi, 1969).

- C. Lors de l'exhumation sur failles normales du manteau serpentinitisé, la formation d'ophicalcite est fréquente (Lavoie, 1978). Deux textures ont été définies : la texture BMM englobe les spinelles disséminés et les lentilles de chromites dans la gangue de serpentinite ; tandis que la texture LMM est décrite par les litages précoces des magnétites en alternance avec la serpentinite (Figure VI.5C). La première correspond à d'anciennes zones bréchiques alors que la seconde peut être d'anciennes zones mylonitiques (Figure II.42). Les reliques de spinelles de chromites sont supposées être les objets permettant la remobilisation des éléments et la formation in-situ des minéralisations précoces de Bou Azzer, comme décrit par Fanlo et al. (2012) (Figure VI.5B3et C3). Tout d'abord, comme indiqué dans le tableau paragénetique, le stade à Ni apparaît avec la formation de nickeline lamellaire suivi de rammelsbergite dans la LMM (Figure VI.5C1) ou de rammelsbergite isolée et automorphe, de skuttérodite et de cobaltite dans la BMM (Figure VI.5C3). D'après l'étude de Gervilla et al. (2012), ce type de processus peut se dérouler à des températures élevées ( $\pm 650^{\circ}\text{C}$ ). Cependant entre 300 et 500 °C, seuls la lizardite et le chrysotile peuvent se former dans des conditions stables (Mével, 2003). Nous avons montré que les minéralisations précoces de Ni et de Co sont fracturées par de la serpentine. Les minéralisations massives de Bou Azzer décrivent le passage d'un fluide estimé comme chaud (284.3 °C en moyenne), variable en pression (de 4 à 43 bars), riche en halite (entre 23.5 et 41.2 % en eq. NaCl), en CaCl<sub>2</sub> (entre 3.7 et 17.6 %eq CaCl<sub>2</sub>) et en

méthane. Ces différents paramètres favorisent le transport des métaux par le fluide. Un fluide minéralisateur lessivant les magnétites, les spinelles altérés et la serpentinite aura une signature particulière en éléments métalliques (Co, Ni, Zn, Bi, Ag, S, As) et en éléments traces comme observée précédemment (Na, K, Li, B) (cette étude ; Gahlan et al., 2006, Pagé & Barnes, 2009 ; Zhou et al., 2014). Lors de l'exhumation de la serpentinite, les fragments de l'ophicalcite composée de brèches de pente de serpentinite peuvent créer des vides pluri-décimétriques entre les fragments de la serpentinite et de la diorite quartzique (Figure VI.5B2). La circulation préférentielle du fluide sera alors favorisée dans cette zone fracturée. Malheureusement, aucune donnée sur l'origine du fluide circulant à ce stade n'a été obtenue.

- D. La formation du gisement de Bou Azzer débute par la formation des minéralisations massives. Les minéralisations massives suivent la même orientation que les lits de magnétites visibles sur le terrain et des structures générales (N120°E). Les reliques de chromites et de spinelles permettent l'apport de métaux à la remobilisation et la précipitation in-situ des arséniures. Nous les trouvons encore au sein de la gangue et associées aux minéralisations (Figure VI.5D). La skuttérudite est le premier minéral à se former et représente le stade à Co. La carbonatation presque totale de l'ophicalcite est illustrée par la gangue carbonatée qui se forme à la fin du stade cobaltifère. La gangue carbonatée décrit les mêmes textures BMM et LMM précédemment discutées. De plus, des fragments de serpentinite ont été observés au sein de la gangue carbonatée. Parfois, la gangue carbonatée peut fracturer les arséniures déjà présents, indiquant un processus progressif et continu (Figures VI.5D1 et 2). Concernant la gangue siliceuse, sa mise en place est encore incertaine. Elle ne se trouve jamais reliée à la gangue carbonatée, mais contient également les minéralisations massives. Le fluide impliqué est le même qu'au stade précédent. La remobilisation in-situ des métaux par le fluide est le processus principal à la formation du stade D. La signature du fluide est la même que celle des spinelles présentée au stade B. Les fluides étudiés dans les gangues encaissantes indiquent des concentrations en métaux anormalement élevées en Ni, Co, Zn, Bi, Ag, Cu et Pb (Figure VI.5D) et en éléments traces, notamment le Li, B, Na, K, Br, Sb. Afin de carbonater la serpentinite, le fluide doit déjà être enrichi en Ca, Mg, Fe, Mn et CO<sub>2</sub>. L'altération de la rammelsbergite, de la nickeline et de la skuttérudite par la cobaltite, et la présence de sulfures associés à la gangue carbonatée, montrent que le S prend une place plus importante à la fin de la mise en place des minéralisations massives (Figures VI.3 et VII.5D1). La présence d'inclusions fluides saumâtres et solides riches en halite à 85% eq. NaCl permet de prouver la présence de ligands (Cl) facilitant le transport des métaux.
- E. Le modèle de mise en place des minéralisations de Bou Azzer se termine par la formation des structures de type veines et poches. Elles présentent les mêmes paragenèses minérales, débutant par du quartz à texture de mosaïque et en peigne associés à des arséniures et des

sulfo-arséniures de Co, de Fe (skuttérodite, cobaltite, loellingite, arsénopyrite) et terminant par des carbonates (Dol 1 et Calc 3 et Calc 4). Même si les minéralisations massives se sont formées en premier, une continuité existe entre les processus responsables de la formation des minéralisations massives et des veines de Bou Azzer. Le contexte de mise en place est différent. La combinaison entre un contrôle structural et hydrothermal permet la formation des minéralisations dans ces espaces ouverts. Les veines montrent une orientation oscillante entre N/S et N070°E, des mouvements senestres et dextres cohérents avec une direction de raccourcissement N030°E. Ces structures sont essentiellement minéralisées lorsqu'elles recoupent les minéralisations massives. Les vides créés lors de l'exhumation du manteau serpentinisé, ont pu être réutilisés par le fluide permettant la formation des poches (Figure VI.5E). Le fluide minéralisateur a la même signature que celui des minéralisations massives. La remobilisation des éléments métalliques (Co, Ni, Fe, Zn, Pb, Bi, Ag, Au) et des éléments traces des minéraux préexistants, les spinelles, les minéralisations de Ni, Co et Fe, permet la précipitation des minéralisations dans les conditions de températures variant de 224°C en moyenne, des fluides avec des salinités de 22.5%pds eq. NaCl en moyenne, et des pressions variant de 4 et 43 bars. La mise en place des veines pourrait être associée à un contexte transtensif précédemment décrit par Tuduri et al. (2018a) pendant la mise en place du complexe supérieur, autour de 560 Ma. Notons que le fluide est toujours enrichi en Zn, Bi, Cu, Na, Li, B et K après la formation des minéralisations de Bou Azzer.

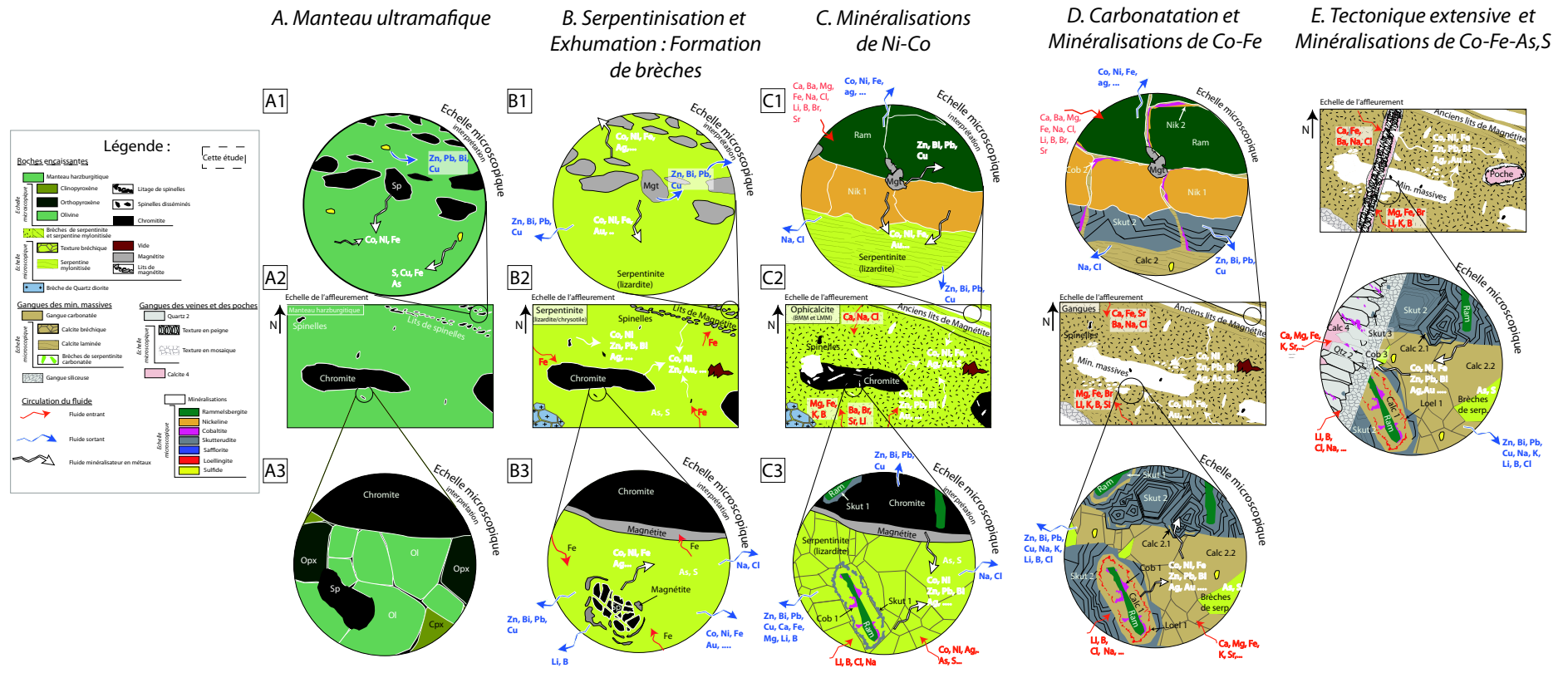


Figure VI.5 : Modèle final de la mise en place des minéralisations de Bou Azzer. Les parties A à C) présentent une interprétation des stades précoces à la mise en place du gisement de Bou Azzer. Les deux derniers stades ont été observés, étudiés et interprétés lors de ce travail de recherche. A gauche, légende du modèle final de la mise en place des minéralisations de Bou Azzer.



## C. Discussion sur le gisement de Bou Azzer

### 1. Comparaison entre les différents types de minéralisation

#### a) *La paragenèse minérale*

L'étude pétro-structurale de Bou Azzer s'est basée sur l'échantillonnage en surface et en profondeur des deux types de minéralisations exploités à ce jour à Bou Azzer. Nous tenons à préciser que le tableau paragénetique proposé (Figure VI.1) est uniquement basé sur l'étude paragénetique des minéralisations et de la gangue minérale encaissante. Des différences apparaissent avec les études menées auparavant par Ennaciri (1995), Dolansky (2007), Ahmed et al. (2009), Gervilla et al. (2012) ou encore Essarraj et al. (2015). En effet, ces auteurs n'ont pas découpé les minéralisations massives des systèmes extensifs (veines et poches). Les gangues minérales encaissant les arséniures et les sulfures ne sont pas les mêmes. Tous s'accordent à mettre une gangue siliceuse en premier lieu, poursuivie de l'évolution d'arséniures de Ni, Co, Fe, de sulfures et se terminant avec une gangue carbonatée (calcite et dolomite). De plus, Ennaciri (1995) couple les deux types de minéralisations. Or, le stade à Ni n'a pas été observé au sein des veines. Cependant, les études menées par Ennaciri (1995), Dolansky (2007), Ahmed et al. (2009) et Gervilla et al. (2012) proposent la même évolution paragénetique des arséniures de Ni, de Co, de Fe vers les sulfures riches en Cu. La mise en place de la skutterudite synchrone de la rammelsbergite est même évoquée par Ahmed et al. (2009). L'évolution paragénetique proposée par Essarraj et al. (2015) a été élaborée dans le gisement argentifère de Bou Azzer, gisement qui reste toutefois très localisé et d'extension restreinte. Malheureusement durant ce travail de recherche, nous n'avons pas pu étudier ce cas qui nous paraît être un cas particulier non représentatif de l'ensemble de la minéralisation de Bou Azzer. La paragenèse proposée par Essarraj et al. (2005) montre tout de même des similitudes par rapport à la séquence paragénetique observée dans les veines et les poches. Certains minéraux n'ont pas été observés tels que la brannerite, l'or en inclusions dans les arséniures de Co et de Ni (skutterudite et rammelsbergite), la molybdénite (e.g., Leblanc & Lbouabi, 1988 ; En-Naciri et al., 1997), le Bi natif (Dolansky, 2007), l'Ag (Ennaciri, 1995 ; Essarraj et al. 1997) ou encore la pyrite (Ahmed et al., 2009).

#### b) *Analyse géochimique des minéralisations.*

La comparaison entre les métaux dans les arséniures et sulfo-arséniures des structures de Bou Azzer a été faite uniquement pour les éléments enrichis (Bi, Sb, Ge, Pb, Au, Ag, Cu). Les arséniures issus des minéralisations massives sont globalement enrichis par rapport aux veines, aux poches et à la serpentinite. Il est observé une évolution en Sb, Bi, Pb, Cu, Au et Ag dans le temps, de la serpentinite vers les minéralisations massives puis aux veines (Figure VI.6A, B et D). Une corrélation positive est visible entre Bi vs Pb et Au vs Ag (Figure VI.6C et D). Ces corrélations peuvent être liées aux inclusions minérales à assemblages de Bi-Pb observées dans les arséniures (Figure VI.4).

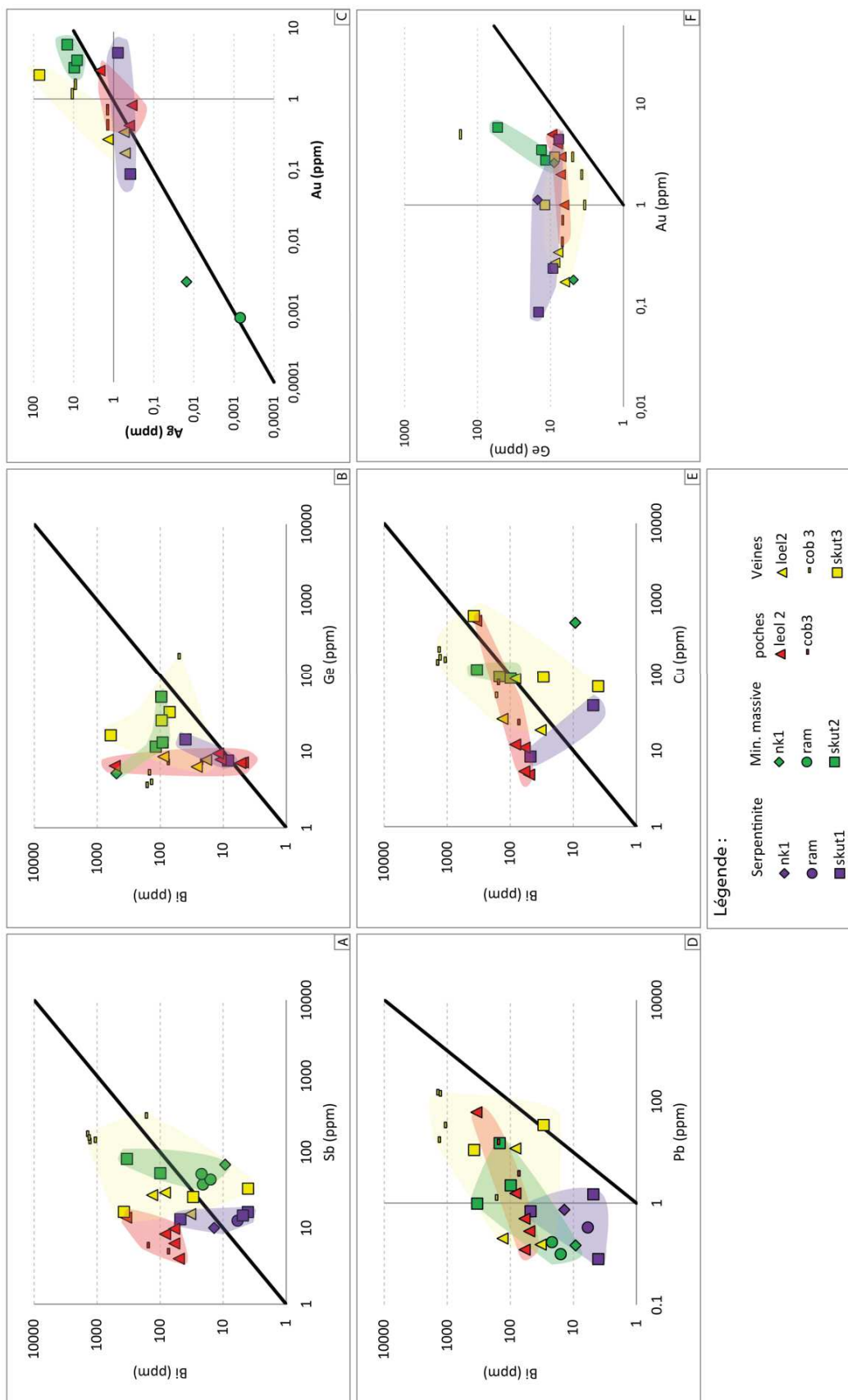


Figure VI.6: Diagramme comparatif des métaux les plus enrichis dans tous les arséniures de Bou Azzer (Données individuelles ds IFs au LA-ICP-MS)

Un second travail basé sur l'étude pétro-structurale (Figure VI.1), a permis de comparer la concentration moyenne en métaux (Co, Bi, Ge, Sb, Fe, Pb, S, Au, Ag) des arséniures cristallisant au même moment. L'enrichissement en métaux dans les différents minéraux analysés montre que :

- La rammelsbergite est plus enrichie en métaux que la nickeline sauf en Ag et Bi (Figure VI.7A). La nickeline peut contenir des inclusions solides en Bi (Figure VI.4).
- Les skuttérudites 1 et 2 sont enrichies, par rapport à la rammelsbergite, en Co, Bi, Sb, Fe, Pb, S, Au et Ag. Cet enrichissement pourrait être lié à une reconcentration des métaux par un fluide plus enrichi en métaux (Figure VI.7B).
- La nickeline issue de l'altération des arséniures le long de fracture (Nik 2) est comparée à la nickeline primaire (Nik 1), celle associée aux minéralisations massives. Cette comparaison est faite afin d'observer un processus d'enrichissement lors de l'altération. La Nik 2 est uniquement enrichie en Sb, Ag et Bi par rapport à la nickeline observée dans la serpentinite et la nickeline 1 des minéralisations massives, respectivement (Figure VI.7C et D). La Nik 2 a pu donc se former en réutilisant les éléments présents dans les minéralisations massives, et obtenir cet enrichissement en métaux.
- Les rammelsbergites analysées dans la serpentinite et les minéralisations massives ne montrent pas d'enrichissement l'une par rapport à l'autre. Ces rammelsbergites se sont donc formées à parti du même fluide (Figure VI.7 E).
- Les skuttérudites 1 et 2 comparées à la nickeline primaire montrent le même comportement que la rammelsbergite. Le même processus de reconcentration des métaux lessivés sur place pourraient expliquer ces enrichissements.
- Les cobaltites 3 au sein des veines, se forment en remplaçant la Skut3, d'où l'intérêt de vérifier cet aspect géochimiquement (Figure VI.7G). Les métaux analysés dans ces arséniures montrent un enrichissement partagé entre les minéralisations : en Au, Ag, Fe et Cu dans la Skut 3 ; en Ge, Pb, Sb, Bi et S dans la cobaltite 3.

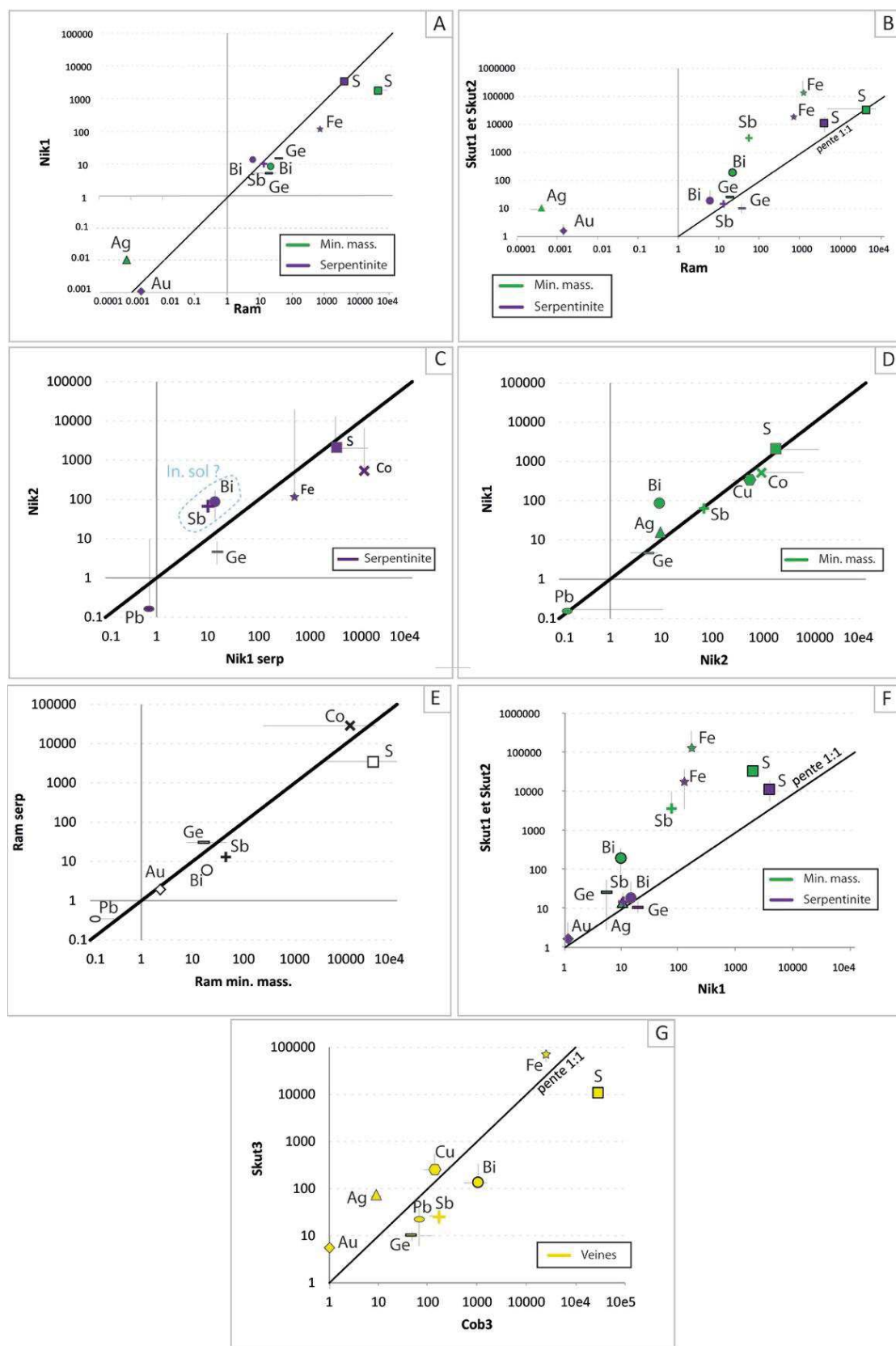


Figure VI.7 : Diagramme comparant la distribution des principaux métaux dans les arsénifères cristallisant ensemble (Données LA-ICP-MS)

**c) Bilan géochimique des fluides en éléments majeurs, traces et métaux.**

Les inclusions fluides analysées au laser LA-ICP-MS sont enrichies en majeurs (Na, Cl, K, Ca), en éléments traces (Li, Br, Ba, Sr, B), et en métaux (Co, Ni, As, S, Fe, Zn, Cu, Pb, Ag). Nous cherchons à comprendre au travers des diagrammes comparatifs si des enrichissements sont visibles en fonction de la mise en place des différentes structures composant le gisement de Bou Azzer.

**Les minéralisations massives vs veines.** Les analyses des inclusions individuelles de type LVS montrent que la gangue siliceuse (Qtz 2) des veines est enrichie en Pb et en Zn par rapport à la gangue siliceuse (Qtz 1) des minéralisations massives (Figure VI.8A). Les autres métaux montrent un enrichissement homogène entre les deux structures. Les gangues carbonatées (Calc 2 et Calc 4.2), quant à elles, montrent des enrichissements hétérogènes entre les structures (Figure VI.8B). Concernant les éléments traces, les gangues siliceuses montrent aussi des enrichissements hétérogènes entre les veines et les minéralisations massives, sauf en B qui est enrichi dans les veines (Figure VI.8C) ; tandis que la gangue carbonatée (Calc 2) est essentiellement appauvrie en B et en Br de deux ordres de grandeurs dans les minéralisations massives (Figure VI.8D).

**Les minéralisations massives vs poches.** Les teneurs en métaux montrent des enrichissements hétérogènes entre les deux structures dans la gangue carbonatée. Un enrichissement en S, Cu et As est observé (Figure VI.9A). La gangue carbonatée (Calc 2) des minéralisations massives montrent le même enrichissement d'un ordre de grandeur en éléments en trace par rapport aux poches sauf en B et en Br (Figure VI.9B).

**Les veines / poches.** Les veines sont plus enrichies en As, Ni, Pb et Fe par rapport aux poches (Figure VI.9C). Concernant les éléments traces, les valeurs sont équivalentes (Figure VI.9D).

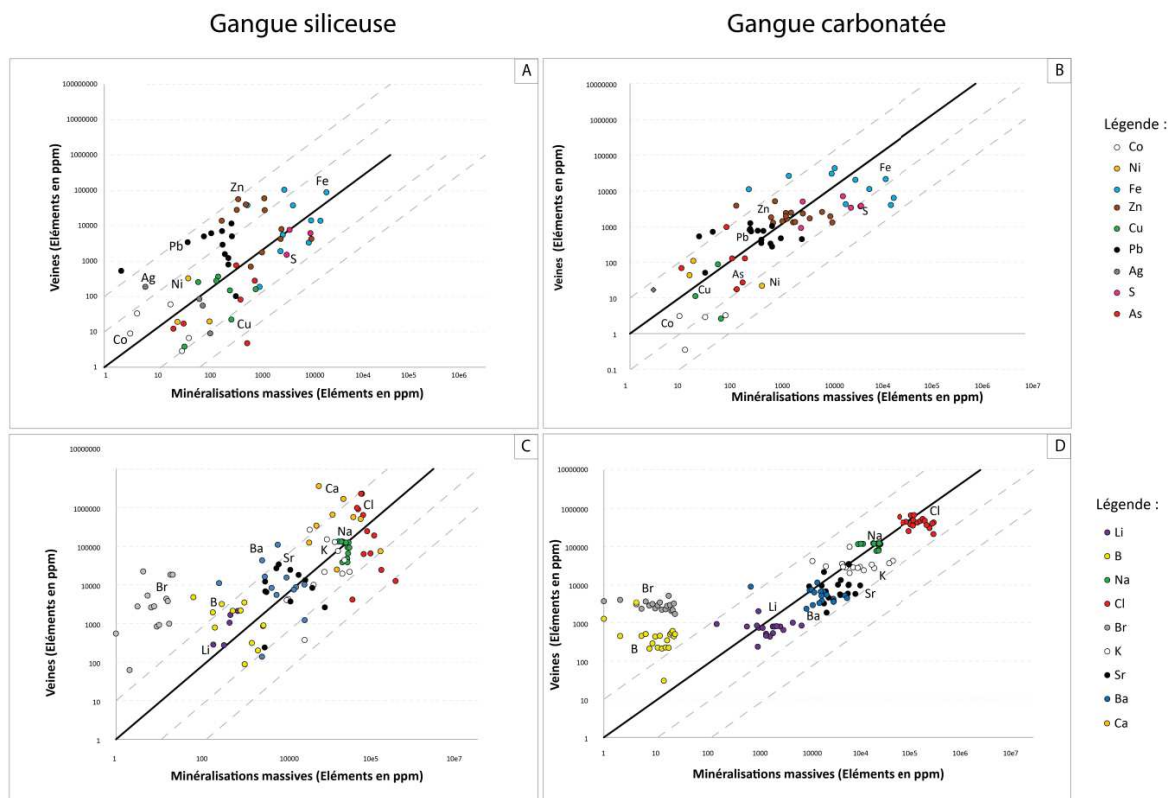


Figure VI.8 : Diagramme comparatif de A-C) la gangue siliceuse et B-D) de la gangue carbonatée entre les veines et les minéralisations massives en A-B) en métaux et C-D) éléments non métalliques (Ag : Ag, As : As, B : B, Ba : Ba, Br : B, Cl : Cl, Co : Co, Cu : Cu, Fe : Fe, K : K, Li : Li, Na :Na, , Pb : Pb, S : S, Sr : Sr, Zn : Zn) (Données LA-ICP-MS)

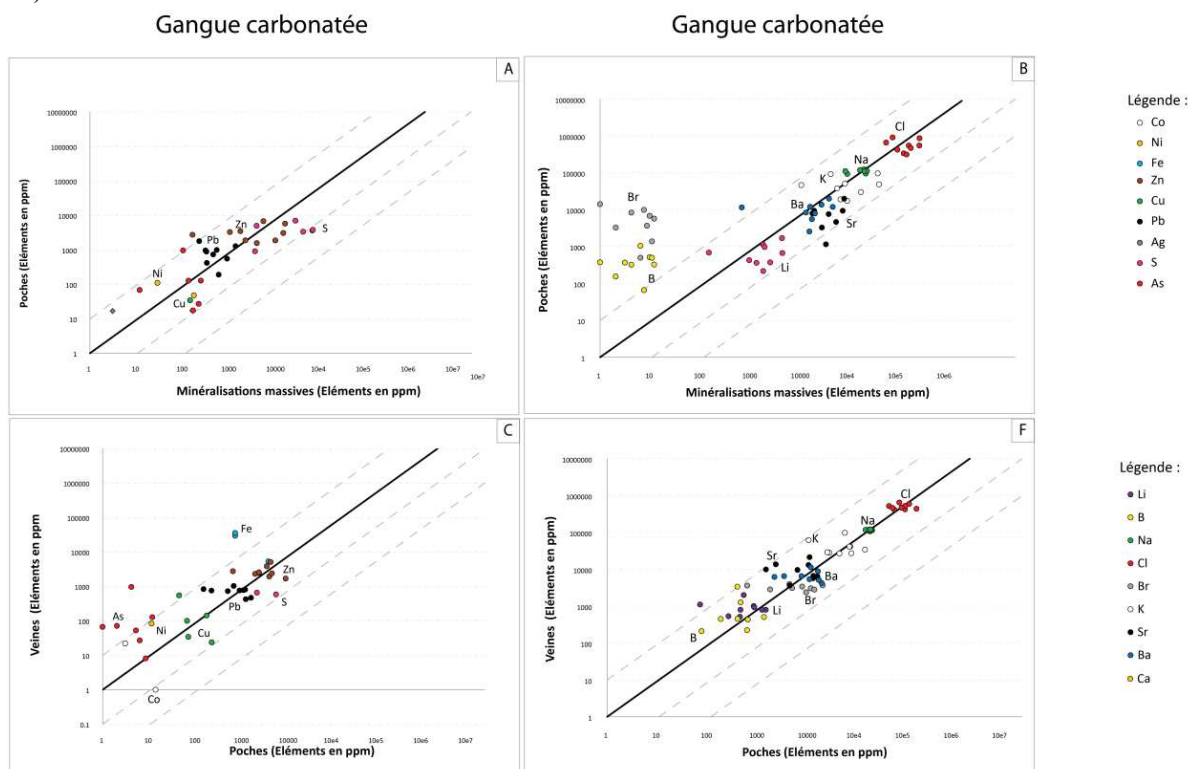


Figure VI.9 : Diagramme comparatif A-C) entre les poches et les minéralisations et B-D) entre les veines et les poches en A-B) en métaux et C-D) éléments non métalliques (Ag : Ag, As : As, B : B, Ba : Ba, Br : B, Cl : Cl, Co : Co, Cu : Cu, Fe : Fe, K : K, Li : Li, Na :Na, , Pb : Pb, S : S, Sr : Sr, Zn : Zn) (Données LA-ICP-MS)

Les analyses en éléments trace réalisées dans les arséniures, les sulfures et les inclusions fluides de Bou Azzer n'avaient jamais été réalisées auparavant. Nous observons ainsi le comportement du fluide au plus proche des minéralisations. D'après la bibliographie, seules les teneurs en éléments majeurs (Co, Ni, Fe, As, S) et en PGM ont pu être étudiées (Gahlan et al., 2006 ; Ahmed et al. 2009) mais pas les enrichissements en Zn, Pb, Ag, Bi, Sb ou encore Ge. Nous observons que les minéralisations associées aux minéralisations massives sont enrichies par rapport à celles contenues dans la serpentinite, notamment la skuttérodite. Du point de vue du fluide, les systèmes de veines et les poches sont plus enrichis en Pb, Zn, B et Ba par rapport aux minéralisations massives. L'enrichissement remarqué dans les skuttérodites et les structures extensives peut être expliqué par la remobilisation des métaux déjà présents dans le milieu et disponibles dans la gangue des minéralisations massives, i.e. les arséniures de Ni et les spinelles. La relation étroite entre les minéralisations massives, les veines et les poches apparaît grâce à l'étude pétro-structurale, l'étude des inclusions fluides et l'étude géochimique du fluide et des minéralisations où les mêmes paragenèses minérales, les mêmes textures, les mêmes types d'inclusions, les mêmes gammes de températures, de pressions et de salinités ainsi que les mêmes signatures élémentaires (Na vs K, Li vs B, Ni vs Co, etc...) ont pu être décrites.

## 2. Contraintes physico-chimiques des fluides minéralisateurs

**Salinité/température.** Les fluides analysés à Bou Azzer ont été comparés aux fluides associés aux études faites sur Bou Azzer (Ennaciri et al. 1997 ; Essarraï et al. 2005), aux gisements argentifères de Zgounder, d'Imiter (Anti-Atlas marocain) et à la mine de Cobalt (Ontario, Canada) (respectivement, Essarraï et al. 1998 ; Essarraï et al. 2016 ; Marshall et al. 1993). Ce choix a été fait car le gisement de Bou Azzer a fait l'objet de comparaison avec ces gisements (Burisch et al., 2017 ; Essarraï et al. 1998 ; Ennaciri et al. 1997). D'après les résultats obtenus par Ennaciri et al. (1997) et Essarraï et al. (2005), basé sur notre étude pétro-structurale, nous estimons ces inclusions seraient associées au type de minéralisation appartenant au système des veines. Contrairement à ce travail, les inclusions fluides de type LVS ont été considérées comme formées dans le système  $H_2O-NaCl-CaCl_2$ . Les teneurs en eq. NaCl calculées par Essarraï et al. (2005) varient entre 5 et 22 % et les températures entre 200 °C et 220 °C. Les salinités calculées par Ennaciri et al. (1997) varient entre 16 et 22 %pds eq. NaCl. Les températures de piégeage du fluide estimées sont entre 185 °C et 240 °C. Les mêmes gammes de températures sont observées dans cette étude, celles d'Ennaciri et al. (1997) et Essarraï et al. (2005) liant ces IFs aux veines minéralisées de Bou Azzer (Figure VI.10). Le gisement argentifère de Zgounder est composé de deux stades minéralisateurs : un stade à As-Co et un stade à Cu-Pb-Ag-Hg (Marcoux & Wadjinny, 2005). Les inclusions fluides VL et V associées au stade à Co appartiennent au système ternaire  $H_2O-NaCl-CO_2$  (Essarraï et al. 1998). Les salinités obtenues varient de 2 à 8 %pds NaCl eq. et les températures minimales de formation varient entre 340 °C et 480°C

(Figure VI.10 - Essarraj et al. 1998). Le stade argentifère décrit des températures entre 160 °C et 200 °C et des salinités élevées de 24 à 40 %pds NaCl + CaCl<sub>2</sub> eq. (Figure VI.10). Essarraj et al. (2016) ont défini un stade à Ni-Co-As et argentifère lors de l'étude du gisement argentifère d'Imiter. Les inclusions fluides se forment dans le système H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-N<sub>2</sub>. Le stade primaire est associé à des inclusions VL et le stade argentifère à des saumures (LVS). La salinité associée au stade cobaltifère d'Imiter varie entre 1 et 6.7 % pds eq. NaCl pour des températures minimales de formation variant entre 284°C et 410°C (Figure VI.10). Le stade argentifère montre des salinités plus élevées entre 16,7 à 26 %pds eq. NaCl et des températures entre 180°C et 220 °C (Figure VI.10). La mine de Cobalt (Ontario) est un gisement de type « five-element veins » (Kissin, 1992 ; Markl et al., 2016 ; Burisch et al., 2017). Les inclusions fluides associées aux minéralisations de Co sont des saumures (LVS) et se sont formées dans le système H<sub>2</sub>O-CaCl<sub>2</sub>-KCl-NaCl montre des variations de température minimale de formation entre : 290 °C et 350 °C, et des salinités calculées à 5%pds eq. NaCl (Figure VI.10).

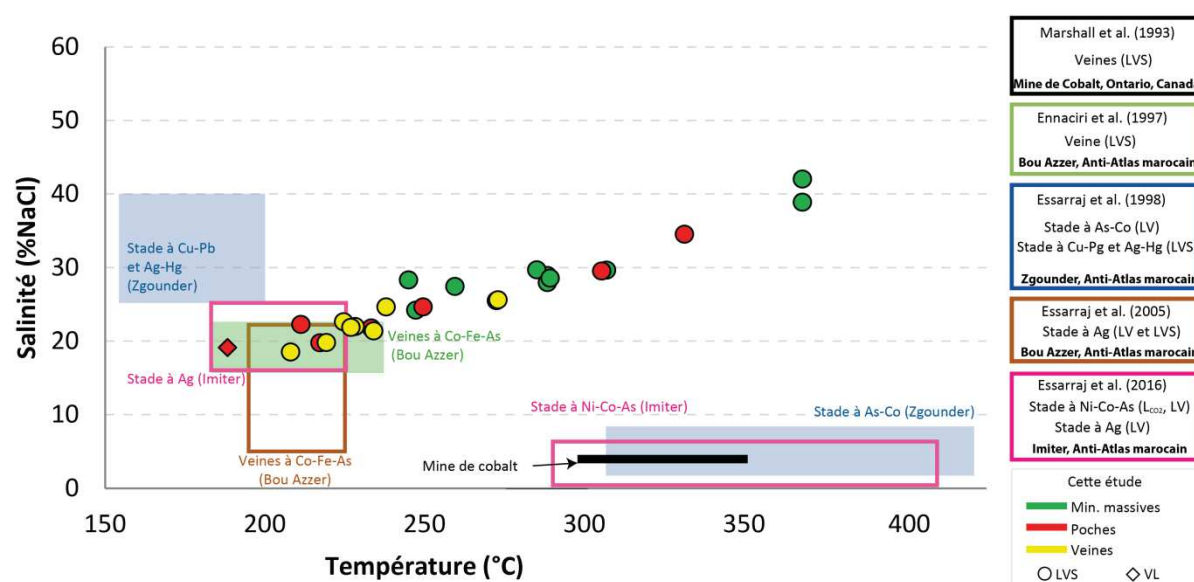


Figure VI.10 : Diagramme comparatif de la salinité par rapport à la température minimale de formation des IF dans différents gisements de l'Anti-Atlas (Bou Azzer, Zgounder et Imiter) et de la mine Cobalt (Ontario)

**Pression/température.** Ces études ont également permis d'étudier la relation entre les pressions et les températures minimales de formation des fluides minéralisateurs des gisements (Figure VI.11). Les études menées par Ennaciri et al. (1997) et Essarraj et al. (2005) proposent des pressions entre à 1000 et 500 bars dans les inclusions associées au stade à Co (Figure VI.11). Les gisements d'Imiter, de Zgounder et de Cobalt ont été ajoutés au diagramme. Le stade cobaltifère d'Imiter défini par Essarraj et al. (2016) montrent des pressions minimales de piégeage du fluide supérieures à 2.7 kbars (Figure VI.11). Le stade argentifère d'Imiter décrit des pressions minimales équivalentes au stade cobaltifère de Bou Azzer décrit par Essarraj et al. (2005). Entre les deux, un épisode intermédiaire associé au stade argentifère montre une diminution des pressions et températures



minimales de 2 kbars à 400 bars et 370 °C et 280 °C (carrés roses - Figure VI.11). Les résultats obtenus quant au stade cobaltifère du gisement de Zgounder présentent des températures élevées (284 °C et 410°C) et des pressions minimales entre 300 bars et 2.5 kbars (Essarraj et al., 1998). La mine de Cobalt présente des pressions minimales entre 800 bars et 1.2 kbars et des températures minimales entre 300 °C et 360 °C. Les données de pression obtenues, lors de ce travail, ne couvrent pas celles obtenues pour le gisement de Bou Azzer, le gisement Cobalt, le gisement argentifère de Zgounder et celui d'Imiter (Figure VI.11). Les valeurs de pressions sont très faibles pour les trois types de minéralisations mais peuvent être expliqués par les phénomènes d'ébullition et de piégeage hétérogène du fluide avancés dans le chapitre III pour les trois types de minéralisations. Les pressions entre 4 et 43 bars donnent des profondeurs inférieures à 200 mètres. Cette profondeur estimée est en accord avec les arguments pour une mise en place des minéralisations sous le plancher océanique après l'exhumation du manteau serpentinitisé.

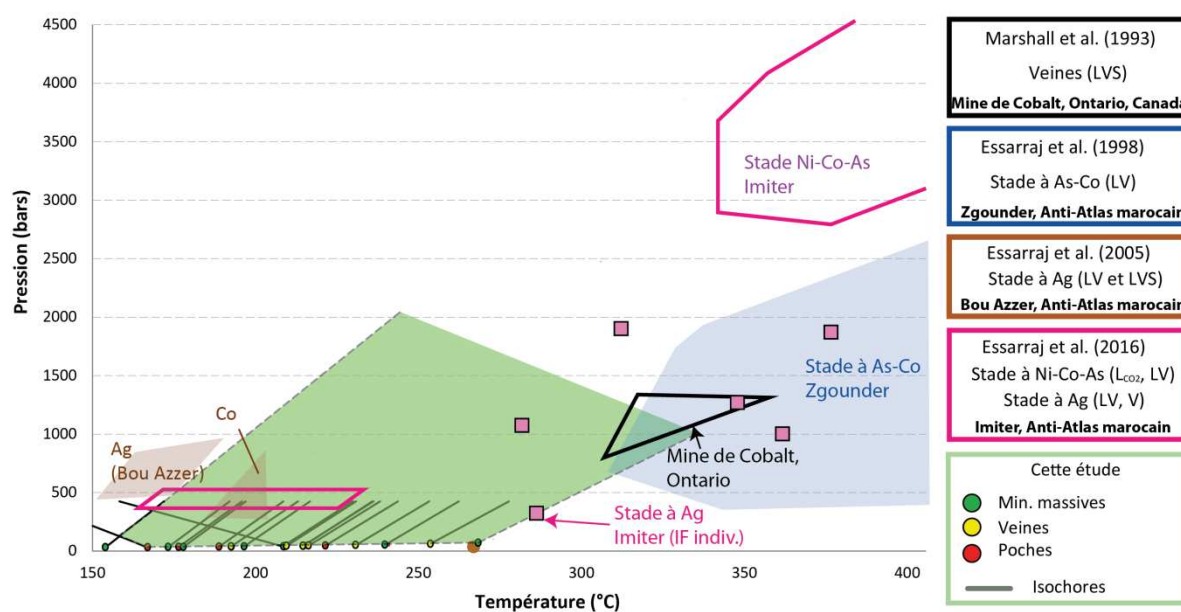


Figure VI.11 : Diagramme Pression/Température du fluide de Bou Azzer et de la mine Cobalt en Ontario (d'après Marshall et al. 1993) (IF indiv. : inclusion fluide individuelle)

**Les inclusions de halite.** Ces inclusions sont observées dans la gangue siliceuse des minéralisations massives et dans la calcite (Calc 4.1) des poches. Elles sont toutes enrichies (par ordre décroissant) en Cl, S, Li, K, Zn, B, As, Fe, Br, Sr, Ba, Cu, Ag, Pb et Ni (Annexe III.3). Une corrélation positive en Li vs B est observée dans les inclusions riches en halite (Figure VI.12A). L'enrichissement en métaux (Pb, Co, Ni, Fe, Zn, Cu) normalisé au Cl est comparé au Cl en concentration molaire, dans ces inclusions poches. Cette relation montre une différence entre les inclusions des poches et des minéralisations massives. Une corrélation positive entre les métaux et le Cl est visible dans les inclusions contenant de la halite des poches (Figure VI.12B). Ennaciri et al. (1997) a également décrit la présence de cube de halite piégé dans la gangue siliceuse des veines de *Aït Ahmane*. Ces inclusions solides riches en halite ont pu se former : soit à partir d'un fluide sursaturé en halite, soit ces inclusions de halite sont précoces à la mise en place des minéralisations et représentent les reliquats de cube de halites issus d'épisode de déshydratation subi par le manteau serpentinisé en contact avec une source chaude (intrusion magmatique) ou en contexte de subduction (Scribano et al., 2017).

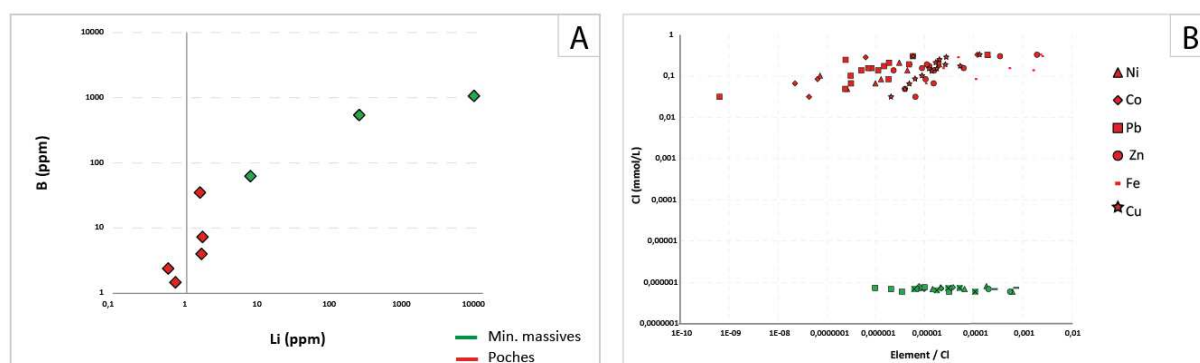


Figure VI.12 : Diagramme binaire des inclusions de halite des gangues des minéralisations massives et des poches, A) B vs Li et B) Cl vs métaux. Les données sont en ppm (Données LA-ICP-MS)

**Le méthane.** Burisch et al. (2017) montre l'importance du méthane comme agent réducteur favorisant la formation de minéralisations, en prenant l'exemple du gisement de type « five-element veins ». Les phases vapeurs d'inclusions V et LVS des minéralisations massives sont composées de méthane (Annexe III.1A). Les études de Ennaciri et al. (1997) et de Essarraj et al. (2005) ont également mis en évidence du méthane et du diazote dans les inclusions fluides triphasées (LVS) associées au quartz des veines. Rappelons que la gangue carbonatée constitue l'encaissant principal des minéralisations massives et a été décrite comme issue de la carbonatation de la gangue précoce de serpentinite au contact bréchique avec la diorite quartzique. Le manteau lithosphérique océanique constitue quant à lui un immense réservoir de méthane car il a été observé au sein d'inclusions monophasées en phase vapeur dans des olivines d'harzburgite (Song et al., 2009). De plus, le processus de serpentinitisation est également connu pour produire une part importante de méthane (Kelley & Früh-Green, 1999 ; Sleep et al., 2004).

### 3. Lien entre minéralisation, gangue carbonatée, spinelle, fluide et serpentinite

*La gangue carbonatée* est l'hôte principal des minéralisations massives. Le lien étroit entre le stade de Ni (Ram) et de Co (Skut2) avec la gangue carbonatée (Calc 1) a été démontré dans l'étude pétro-structurale (cf. chapitre II). Les résultats majeurs de la comparaison entre les minéralisations et la gangue sont présentés ci-dessous : i) une corrélation entre Bi vs Pb dans les différents types de structures a été observée dans les calcites et les minéralisations (Figure VI.13A et D) ; ii) les diagrammes Ni vs Co et Fe vs Co montrent des corrélations différentes entre les minéralisations et les calcites (Figure VI.13B, C, E et F). Les minéralisations indiquent une substitution évidente entre Co, Ni et Fe, tandis que les calcites décrivent une corrélation positive mettant en avant que l'association entre Ni et Co peut se substituer au Ca (Figure VI.13B, C, E et F). L'enrichissement en métaux (Co, Ni, Zn, Pb, Ag) et en éléments traces (Li, B, V, Cr) montre le lien étroit entre les minéralisations et la gangue carbonatée. L'analyse des spectres TR montre un appauvrissement systématique en TR lourdes dans les spectres des calcites des minéralisations massives et des veines. Les spectres TR des calcites issus des poches décrivent un enrichissement en terres rares lourdes. L'appauvrissement en terres rares lourdes systématique dans les calcites des minéralisations massives et des veines peut s'expliquer par : i) la co-cristallisation d'un minéral pouvant incorporer les terres rares lourdes, l'apatite par exemple ; ii) ou le mélange de fluides donnant des signatures en TR différentes. Lors de l'étude des inclusions fluides, des inclusions solides d'apatite et à d'assemblage de Mg-Al-Fe ont été observées dans les calcites. D'après l'étude paragenétique, les calcites et les minéralisations d'intérêt économique se forment en même temps à la fin du stade à Co et au début du stade à Fe dans les trois types de structures. Hormis la relation entre le Bi et le Pb de la gangue carbonatée et des arséniures, le comportement des métaux (Ni, Co, Fe) diffère. Le processus d'incorporation n'est pas le même. La substitution entre le Ni ( $\text{Ni}^{2+}$ ), le Co ( $\text{Co}^{2+}$ ) et le Fe ( $\text{Fe}^{2+}$ ) est facilitée dans les arséniures tandis que l'échange de Ni et de Co avec, probablement, le Ca ( $\text{Ca}^{2+}$ ) est possible dans les calcites.

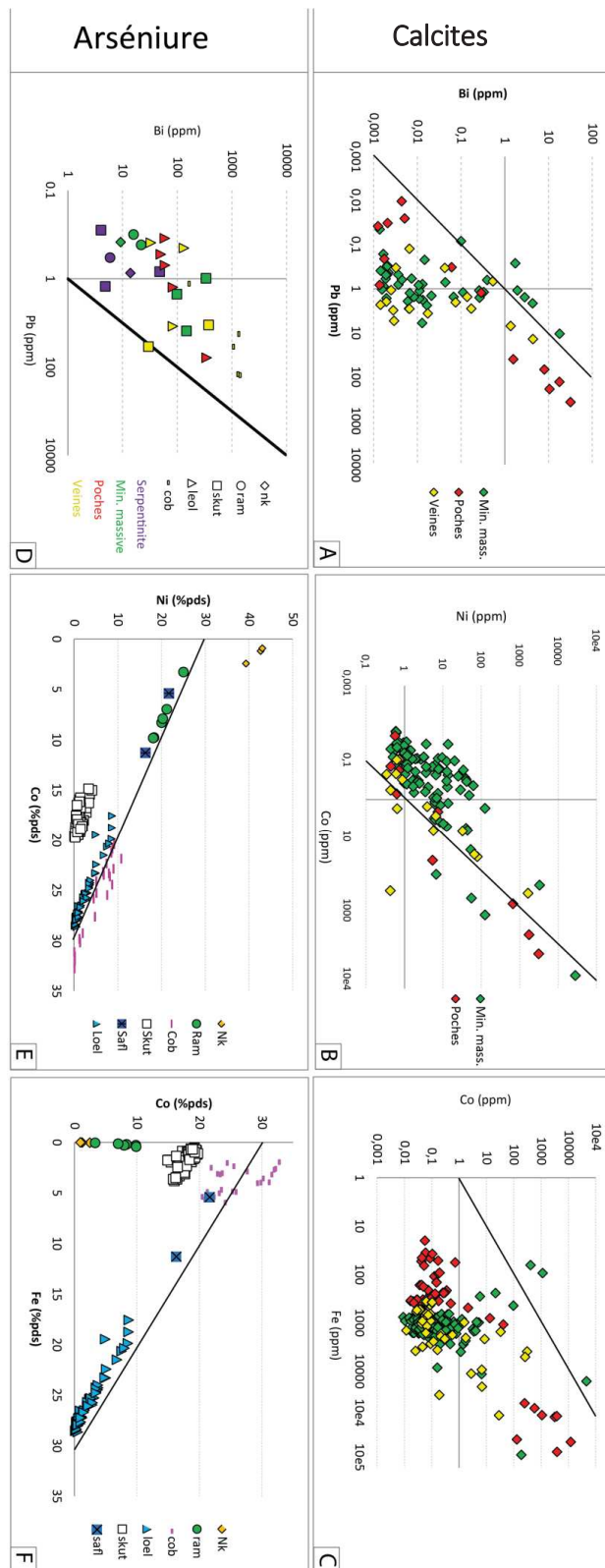


Figure VI.13 : Comparaison entre A-B-C) les calcites et D-E-F) les arseniures concernant le comportement combiné de certains métaux (les lignes noires représentent les pentes 1 :1 – A à D) Données LA-ICP-MS - E et F) Données microsonde

**Les spinelles** analysés dans les structures de Bou Azzer sont des reliques du manteau serpentinisé (Fanlo et al., 2015). Les spinelles montrent une relation étroite avec les calcites car ils décrivent la même corrélation positive et la même pente entre le Co et le Cr (Figure VI.14A et C). La corrélation négative entre Ni vs Co est observée dans les spinelles (Figure VI.14D) et dans les minéralisations (Figure VI.14E). La relation entre le Ni vs Co dans le fluide est équivalente à celle des calcites analysées dans les veines et les poches (Figure VI.14A et F). Les spinelles étudiés sont également comparés avec les données de spinelles chromifères associés à l’ophiolite de Bou Azzer (El Ghorfi et al., 2007) (Figure VI.14D). Il n’y a pas de corrélation entre le Co et le Ni, ni d’enrichissement aussi conséquent dans les spinelles chromifères de l’ophiolite de Bou Azzer (El ghorfi et al., 2007). Les spinelles analysés dans les gisements de Bou Azzer ne montrent pas la même signature que ceux issus du manteau serpentinisé. Les fluides traversant la serpentinite au contact avec les minéralisations massives, le contact minéralisé entre la serpentinite et la diorite quartzique ou encore les poches ont influencés la nature des spinelles. La signature entre Na vs K et Li vs B est identique dans les calcites, les spinelles et le fluide avec plus ou moins les mêmes pentes 1 :1 (Figure VI.15).

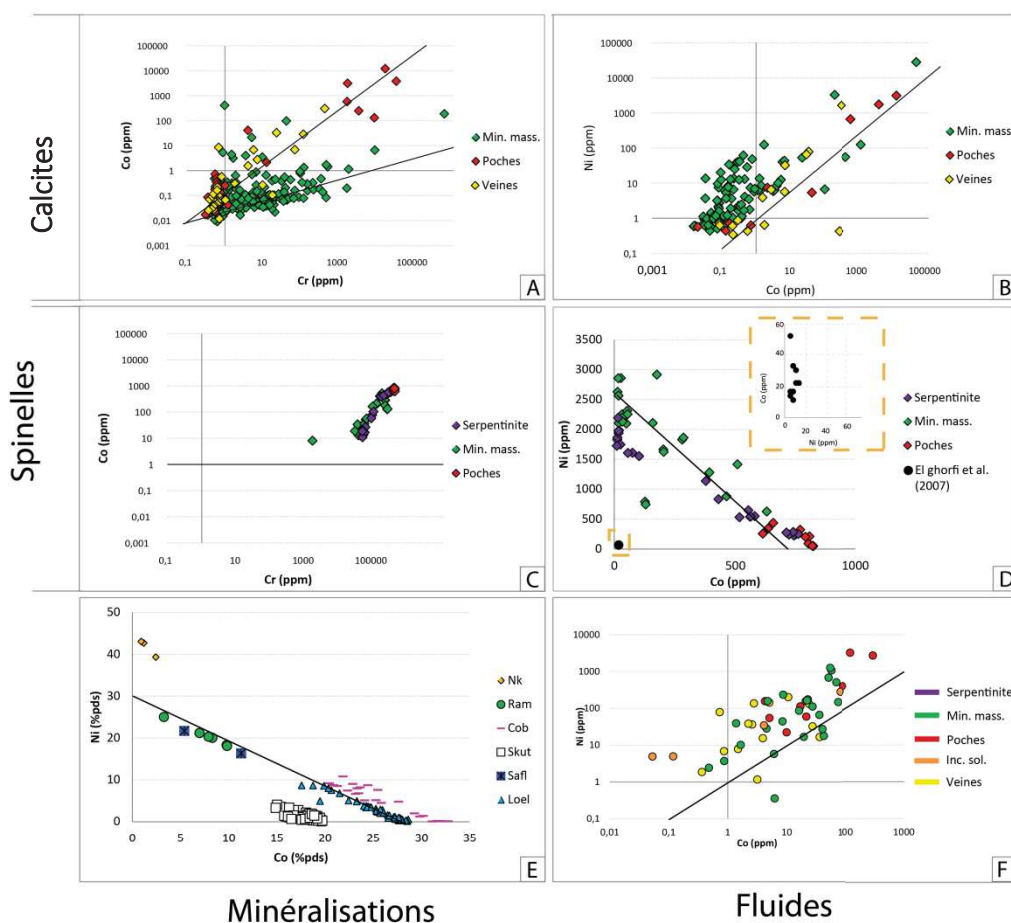


Figure VI.14 : Comparaison A-B) des calcites avec C-D) les spinelles E) les arsénifères et F) le fluide des différentes structures exploitées à Bou Azzer (A à D et F : Données LA-ICP-MS – E : Données microsonde)

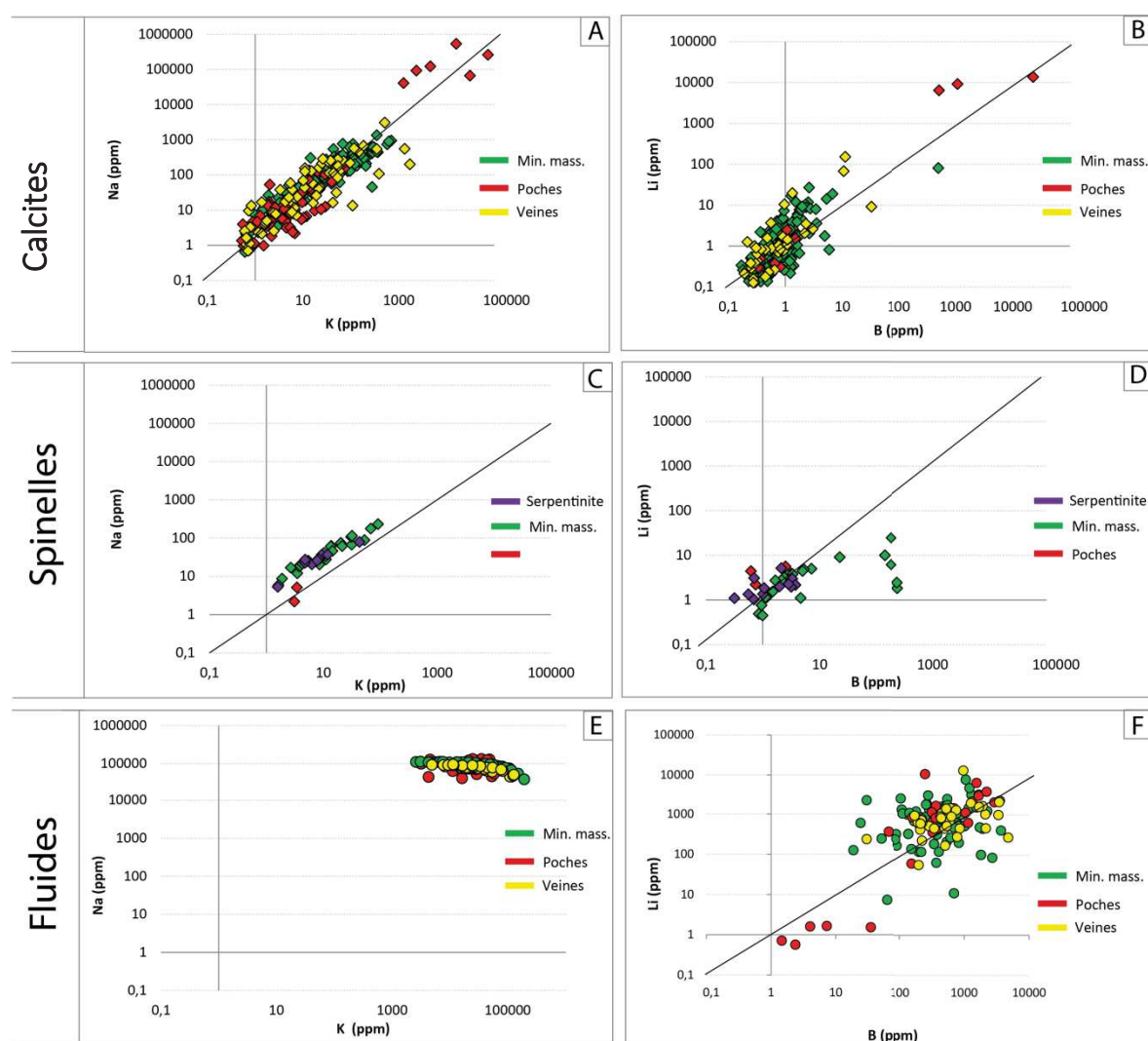


Figure VI.15 : Diagrammes binaires représentant A-C-E) Na vs K et B-D-F) Li vs B (en ppm) dans les calcites, les spinelles et le fluide de Bou Azzer

La serpentinite de Bou Azzer non affectée par les minéralisations a fait l'objet d'analyses en éléments en trace sur roche totale par Paquez (2017). La figure VI.16 permet de comparer les données obtenues dans les calcites et les spinelles (Figure VI.16A à D) aux analyses effectuées dans le manteau serpentinisé (Figure VI.16E) et dans les serpentinites formées dans des contextes différents (le coin mantellique, la zone de subduction et les péridotes abyssales sousdorsales) (Figure VI.16F) (Deschamps et al., 2013). Les résultats majeurs sont les suivants : i) une corrélation positive entre le Zn et le V est observée uniquement au sein des calcites et des spinelles (Figure VI.16A et C), malgré des pentes différentes en fonction des structures ; ii) une corrélation entre le V et le Cr est observée dans les calcites, les spinelles et les serpentinites définies par Deschamps et al. (2013). Les serpentinites de Bou Azzer, non affectées par les minéralisations, ne montrent pas de corrélation entre le V et le Cr, ni entre le Zn et le V. Ces changements de la signature en V vs Cr dans la serpentinite de Bou Azzer roche peuvent être liés à la carbonatation de celle-ci.

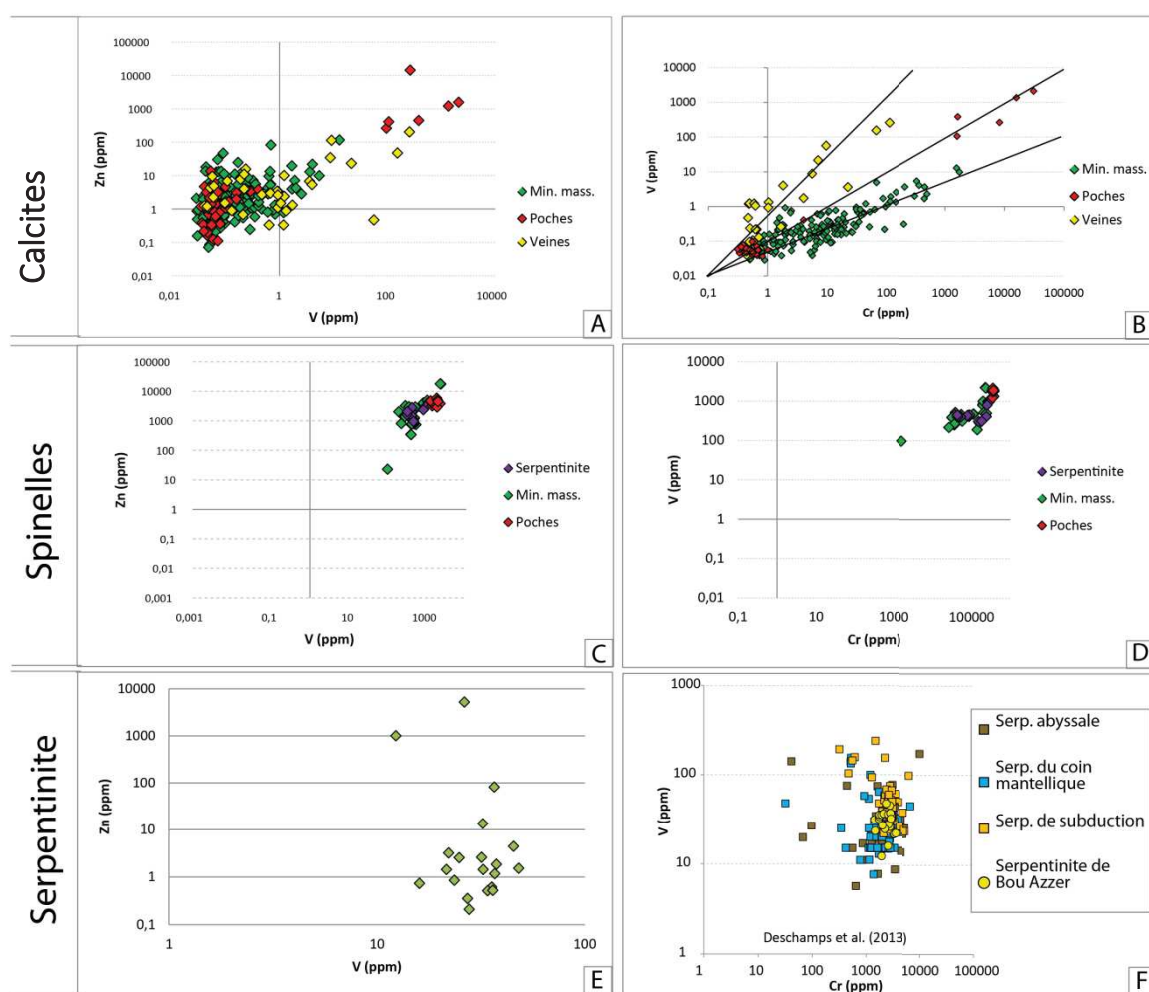


Figure VI.16 : Comparaison de l'étude A-B) des calcites avec C-D) les spinelles et E-F) les serpentinites de Bou Azzer comparées à des serpentinites issues de différents contexte de mise en place (d'après Deschamps et al., 2013) (Données LA-ICP-MS)

Paquez (2017) montre que la serpentinite est abyssale et caractérise le protolithe de la serpentinite comme une harzburgite ultra-réfractaire. Le manteau harzburgitique montre, de par son enrichissement en terres rares légères, qu'une altération hydrothermale peut être en lien avec la serpentinitisation. En effet, lors d'une subduction ou d'une océanisation en contexte hyper-extensif, les serpentinites abyssales peuvent être fortement affectées par l'hydratation par de l'eau de mer circulant le long de fractures à proximité du fond marin (Pagé & Hattori, 2019). Le gisement de Bou Azzer est encaissé par une serpentinite précoce carbonatée et est constitué de reliques de spinelles, de minéralisations riches en Ni et Co, d'une gangue carbonatée et du fluide minéralisateur, qui ensemble permettent de construire la mise en place du minerai. Les spinelles jouent un rôle essentiel dans l'origine des métaux et la signature des calcites, des minéralisations de Ni-Co-Fe et du fluide. Rappelons que des enrichissements en Zn, Bi, Pb et Cu ont été décrits dans les inclusions fluides, les minéralisations de Ni-Co-Fe, les spinelles et les calcites. Fanlo et al. (2015) ont étudié les spinelles chromifères de Bou

Azzer qui présentent un enrichissement important en Zn et Co (4.9 pds% de ZnO et jusqu'à 2.3 pds% de CoO). Malheureusement lors de cette étude, les analyses des éléments du groupe du platine (PGM—Os, Ir, Ru, Rh, Pt et Pd) n'ont pas pu être réalisées. Cependant, les spinelles et les lentilles de chromites de Bou Azzer inclus dans la serpentinite montrent un enrichissement moyen en éléments PGM de 339 ppb et de 6 ppb d'or (Ahmed et al. 2009a). Les arséniures de Bou Azzer montrent un enrichissement en éléments PGM et Au (Ahmed et al., 2009a ; El Ghorfi et al. 2007). Les teneurs moyennes en PGM sont de 56 ppb dans les harzburgites serpentinisées de Bou Azzer (Ahmed et al. 2009a), de 200 ppb dans les spinelles (El Ghorfi et al. 2007), et variant de 11 à 74 ppb dans les minéralisations de Co-Ni-Fe de Bou Azzer (Ahmed et al. 2009a). Les PGM normalisée aux chondrites dans la serpentinite de Bou Azzer et des minéralisations de Co-Ni sont les mêmes car les minéralisations rentrent dans le champ de la serpentinite (Figure VI.17) (Ahmed et al. 2009a). Les PGM étant immobiles, ce résultat relie fortement l'origine des minéralisations au serpentinite. Il serait intéressant d'analyser les teneurs en PGM dans la gangue carbonatée, car elle s'est formée durant la carbonatation de la gangue précoce de serpentinite et qu'elle est composée de reliques de spinelles primaires issus du manteau serpentinisé (Figure II.36B) et de fragments de serpentinite (Figure II.39G).

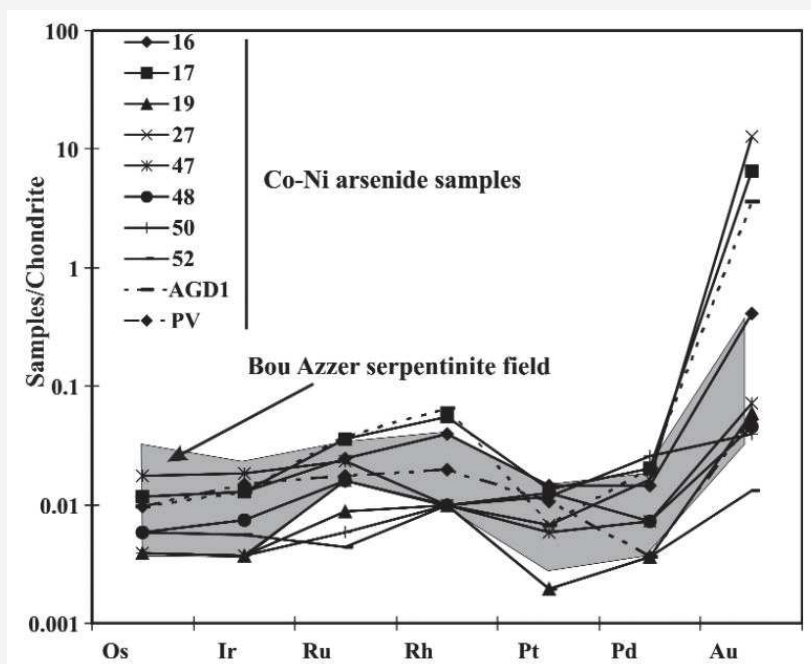


Figure VI.17 : Schémas de distribution des PGM normalisés aux chondrites des gisements de Co-Ni de Bou Azzer. Le champ de composition des valeurs de PGM des serpentinites de Bou Azzer est montré pour comparaison (Ahmed et al. 2009a)



#### 4. Implications sur la tectonique et la géodynamique de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara

##### a) *Formation des minéralisations massives en lien avec l'exhumation des serpentinites*

D'après l'ensemble des auteurs, les contacts entre les roches du complexe ultramafiques et la diorite quartzique sont majeurs à la mise en place de l'ophiolite de Bou Azzer et seraient, pour la plupart, des chevauchements à vergence nord (et/ou sud) en lien avec la subduction du COA sous un continent disparu (Chap. I). Les nouvelles données texturales et minéralogiques, comme présentées dans ce chapitre, définissent majoritairement une géométrie constante où les serpentinites se retrouvent systématiquement sous les quartz-diorites ou les roches volcaniques. La présence sporadique des carapaces et des birbirites correspond, dans ce modèle, aux lentilles de brèches sédimentaires qui peuvent caractériser l'environnement de formation des failles de détachement à faible pendage. Dans ce cas, la brèche à fragments de serpentinite, magnétite, chromite et certainement d'autres natures peut être assimilée à ce qui a été défini comme des ophicalcites, concept qui a été tout particulièrement décrit dans les domaines d'extension et d'exhumation du manteau (Hölker et al., 2003, Lagabriele & Bodinier, 2008 ; Caby, 2014). Ces roches sont intimement associées au concept récent d'exhumation d'un manteau dans une marge continentale extrêmement amincie et/ou une transition de continent océanique (TOC). Ainsi, il est raisonnable de penser que la mise en place des unités ultramafiques de Bou Azzer puisse être réalisée en contexte d'hyper extension développée en position d'arrière-arc par rapport à la zone de subduction à vergence nord suggéré dans le modèle géodynamique de Triantafyllou et al. (2018). Ce modèle proposait que la subduction à vergence nord soit responsable de la formation des complexes d'arcs de de Tichibanine/Bougmane, fortement affectés par des épisodes de déformation liés au contexte compressif d'orientation N/S. L'extension back-arc serait responsable de la séparation en deux du complexe d'arc et expliquerait pourquoi ces deux domaines d'arcs se retrouvent maintenant un au nord (Tichedinne domain) et un au sud (Bougmane), de part et d'autre de ce que l'on a interprété comme un dôme exhumé de serpentinite (Figures II.28 et VI.18).

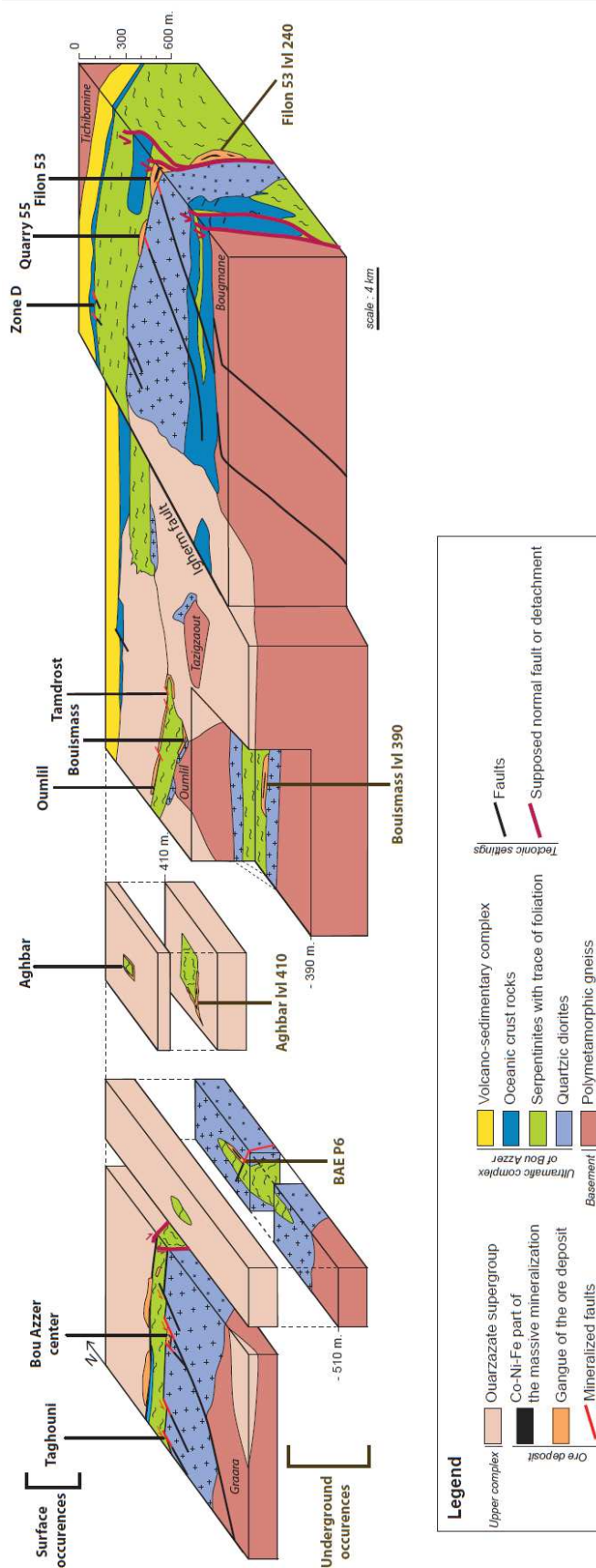
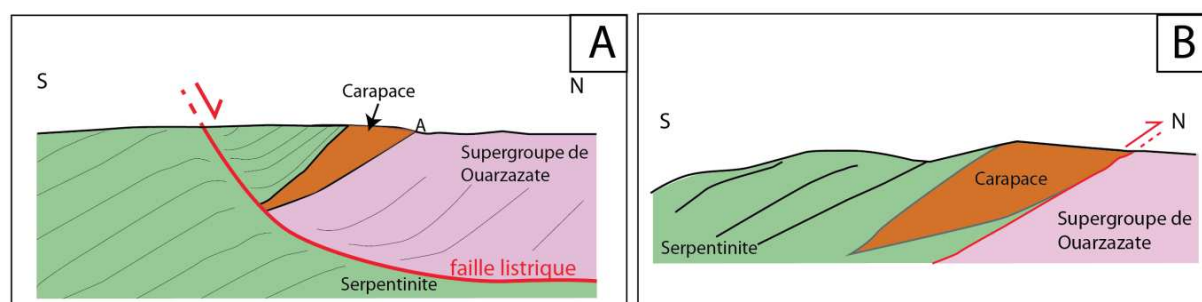


Figure VI.18 : Dessin schématique de la répartition des principales unités géologiques du district de Co-Ni de Bou Azzer

Les contacts entre les minéralisations et les roches encaissantes ne montrent que rarement des indications cinématiques en faille normale ou en faille inverse. Il est important de préciser que tous les contacts de la serpentinite avec les roches de la boutonnière, situés au nord, sont à pendage nord, et les contacts situés au sud sont à pendage sud, définissant ainsi une forme en dôme du manteau serpentinisé et de la série océanique associée (Figure VI.18). On notera toutefois que la majorité de ces contacts ont montré des arguments de terrain en faveur d'un jeu normal (Figures VI.5, VI.6 et VI.7) ce qui a été confirmé par les coupes structurales du travail de Paquez (2017). Un seul affleurement va à l'encontre de ces observations, les tranchées proches de *Bou Azzer Est Puit 3* où des évidences de contacts inverses ont été observées entre les serpentinites et les roches volcaniques du complexe supérieur. Toutefois, plusieurs interprétations peuvent expliquer ce cas insolite (Figure VI.19) : i) le jeu d'une faille listrique normale permettant la mise en place d'un morceau du manteau serpentinisé et de carapace sur les roches volcaniques précambriennes. Ce contact pouvant laisser penser à une faille inverse (Figure VI.19A) ; ii) le chevauchement tardif de la serpentinite sur les roches du Supergroupe de Ouarzazate (Figure VI.19B), comme également observé par exemple, au sein des unités volcaniques (Mifdal & Peucat, 1985; Blein et al., 2014; Tuduri et al., 2018).



**Figure VI.19 : Interprétation du contact anormal entre serpentinite et roches du Supergroupe de Ouarzazate. A) Hypothèse 1 : Faille listrique permettant la mise en place d'un morceau du manteau serpentinisé sur les roches volcaniques précambriennes. B) Hypothèse 2 : Chevauchement en faille inverse lors d'une période de compression tardive permettant la mise en place de la serpentinite sur les roches volcaniques du Supergroupe de Ouarzazate**

Une récente étude thermochronologique basée sur l'analyse des âges traces de fission sur apatites de la bordure nord du Craton Ouest-Africain a conclu que les roches plutoniques de la fenêtre de Bou Azzer se trouvaient à environ 2 km de profondeur au Néoprotérozoïque (Oukassou et al., 2013). La présence de ces roches plutoniques si proche de la surface à cette période est en accord avec l'hypothèse d'exhumation proposée dans ce travail.

### **b) Rôle de la diorite quartzite**

La diorite quartzique joue un rôle important dans la mise en place des minéralisations, elle forme systématiquement la partie supérieure (ou hangingwall) des contacts avec les serpentinites. Lorsqu'il n'y a pas de minéralisations massives, de fins niveaux de rodingite marquent alors ce contact traduisant tout de même des réactions de métasomatisme. Grâce aux observations de terrain, la mise en

place de la diorite quartzique a été définie comme intrusive dans les dykes basiques associés au complexe ultramafique de Bou Azzer (Figures II.3B, II.17D et VI.4B ; Bodinier et al., 1984). La signature calco-alkaline de la diorite quartzique est incompatible avec une mise en place après l'obduction de l'ophiolite (Bodinier et al., 1984). Le magmatisme tholeiitique (Tichibanine) et les intrusions calco-alkaline (diorite quartzique) recouvertes par une séquence volcano-sédimentaire du Supergroupe de Ouarzazate suggèreraient que leur mise en place se déroule lors de l'ouverture d'un bassin océanique derrière un arc insulaire. La mise en place de la diorite quartzique pourrait alors être synchronique de l'exhumation en domaine d'amincissement de croûte continentale. De plus, le contact intrusif et les indices métasomatiques sont des arguments supplémentaires à l'hypothèse de mise en place de la diorite pendant l'exhumation du manteau serpentinisé.

### c) *Age de formation du système minéralisé*

L'exhumation de la serpentinite de Bou Azzer associée à la formation des minéralisations est interprétée comme étant relativement précoce dans l'histoire de la boutonnière si l'on considère par exemple que les roches détritiques du groupe de Tiddiline, attribuées au complexe inférieur, peuvent représenter des sédiments clastiques liés à cette exhumation. Toutefois, cette activité semble se poursuivre jusqu'au dépôt du Supergroupe de Ouarzazate puisque la base de ce dernier est parfois réactivée et bréchifiée en faille normale juste au-dessus des serpentinites (Figure VI.4B). Elle semble par contre clairement anté-Adoudounien (unité qui marque la transition entre le Précambrien et le Cambrie - Pouit, 1966; Bouchta et al., 1977 ; Tucker, 1986; Latham & Riding, 1990; Gasquet et al., 2001). Plusieurs observations de terrain confirment ces assomptions : i) aucune veine reliée au gisement de Bou Azzer ne recoupe la formation Cambrienne de l'Adoudounien (Figure I.13) ; ii) des brèches de birbirites représentant en surface la gangue siliceuse des minéralisations massives sont visibles à la base du Supergroupe de Ouarzazate (Figure II.4D) ; iii) la relation entre la serpentinite et le Supergroupe de Ouarzazate a été décrite au travers de contacts anormaux (Figure VI.18).

Les études précédentes sur le gisement de Bou Azzer traduisent un désaccord sur l'âge et l'environnement de mise en place du gisement. Plusieurs âges correspondant au Dévonien Supérieur ont été obtenus (308 à 310 Ma sur carbonate et brannerite,  $218 \pm 8$  Ma sur adulaire,  $383 \pm 7$  Ma à  $257 \pm 8$  Ma sur brannerite ; respectivement Oberthür et al., 2009 ; Levresse, 2001 ; Dolansky, 2007). À l'opposé, d'autres âges sont reliés au Néoprotérozoïque ( $510 \pm 10$  Ma sur brannerite,  $533 \pm 2$  Ma et  $531 \pm 5$  Ma sur zircon ; respectivement Ennaciri et al., 1997 ; Levresse, 2001 ; Gasquet et al., 2005). Le polyphasage tectonique et les nombreuses circulations de fluides pourraient expliquer la complexité des âges obtenus jusqu'à présent, influencés à la fois par des épisodes d'âge Néoprotérozoïque et Hercynien.

Les veines et les poches représentent des structures formées en ouverture. Le contexte transtensif mis en place selon une direction de raccourcissement orientée N°30 a été décrit dans la Zone des dykes, le gisement d'Imiter et de Thagassa est associé à la mise en place de ce qui est appelé complexe supérieur (550 Ma). Cette direction de raccourcissement (Tuduri et al., 2018a) est cohérente avec les jeux normaux, sénestres et dextres observés dans les veines de Bou Azzer. Cependant, nous avons obtenu un âge dévonien à 365 Ma dans des titanites liées à une carbonatation et une chloritisation de la diorite quartzique. Nous retrouvons donc la dualité entre âge néoproterozoïque et hercynien comme évoqué ci-dessus. Ces titanites se trouvent proches de veines minéralisées. A ce stade, il est impossible de savoir si les veines sont responsables de ces altérations de la diorite et si donc l'âge obtenu témoigne d'un rajeunissement de nature hydrothermal tardif ou si cet âge, s'il est représentatif d'un événement tectonique ou minéralisateur, correspond à l'âge de la minéralisation. Frizon De Lamotte et al. (2013) décrivent une période extensive qui correspond à l'ensemble des âges dévoniens. Cette période constitue un bon candidat pour expliquer la mise en place du système de veines et de poches en contexte extensif à Bou Azzer. Cet événement extensif irait à l'encontre de la proposition de continuum entre les systèmes de minéralisations massives et les veines qui est un des résultats majeur de cette étude. D'après nos résultats pétro-structuraux, il est sûr que les minéralisations massives de Bou Azzer ont une histoire génétique liée à la mise en place et à la tectonisation du manteau serpentinisé, certainement en contexte d'exhumation par faille normale plutôt que par obduction.

## 5. Source et origine du fluide

### a) Source des éléments

Le lessivage des structures et des roches encaissantes est à l'origine de la remobilisation des éléments constituant le gisement de Bou Azzer, à savoir les métaux économiques tels que le Ni, le Co, l'As ou même le Cu, le Zn ou le Pb. Le Ni et le Co ont une meilleure affinité avec les oxydes de Fe tels que les magnétites, les spinelles, les chromites mais également les silicates de roches ultramafiques (Hart et Davis, 1978 ; Righter et al., 2006 ; Laubier et al. 2014). Les spinelles analysés lors de cette étude montrent des concentrations moyennes en Co de 330 ppm et en Ni de 1289 ppm (Annexe IV.4) Le Co et le Ni trouvent donc leur origine principalement dans les roches du manteau serpentinisé et ses constituants. L'As peut être concentré dans des minéraux tels que les spinelles, la magnétite et l'apatite (Smedley & Kinniburgh, 2002, Annexe II.5). Les spinelles analysés lors de cette étude montrent des concentrations moyennes en As de 173 ppm (Annexe IV.4) ce qui semble insuffisant pour en faire une potentielle source. Il peut aussi trouver son origine dans les magnétites issues de la serpentinitisation ou encore de la diorite quartzique qui contient de nombreux grains d'apatites. Ahmed et al. (2009) attribue la source de l'As à la serpentinite. D'autres auteurs attribuent l'origine de l'As aux roches sédimentaires environnantes (Ennaciri et al., 1997 ; El Ghorfi et al.,

2008). Les roches volcano-sédimentaires du Supergroupe de Ouarzazate, également contemporain, au moins en partie, avec le processus d'exhumation et donc de la mise en place des minéralisations massives (Chap. II) pourrait également être un candidat pour être la source de l'As à Bou Azzer. Il a été démontré que les teneurs en As et en sulfures sont plus enrichies dans les serpentinites comparées au manteau appauvri (Deschamps et al., 2013). Ainsi, en contexte de subduction, l'As se trouve transféré de la plaque plongeante vers le coin mantellique et incorporé dans la serpentinite et ce, jusqu'à des profondeurs de 25 km (Deschamps et al., 2013). En contexte d'exhumation du manteau serpentinitisé, l'As pourrait alors provenir des fragments de serpentinites riches en spinelles, magnétites, de diorite quartzique ou de roches sédimentaires du Supergroupe de Ouarzazate. Cet argument a été notamment avancé par Smedley & Kinniburgh (2002).

### **b) Transport du fluide**

Les fluides hydrothermaux à l'origine de la mise en place de gisement transportent les métaux grâce à différents processus (Cathelineau et al., 2011). Trois conditions sont nécessaires : i) une concentration en ligand (le Cl dans notre cas - Seward et al., 2014) suffisamment élevée pour favoriser l'extraction des métaux (Ni, Co, Fe, Zn, Pb, ...); ii) des fluides avec des salinités et des températures suffisamment élevées pour favoriser le lessivage des métaux; iii) un fluide en déséquilibre avec les phases porteuses de métaux par variation de température et/ou de pression, par ébullition, par réactions entre le fluide et les roches encaissantes ou par mélange de fluides (Cathelineau et al., 2011). D'après nos données et celles de la littérature, le gisement de Bou Azzer est caractérisé par un fluide chaud (entre à 300 °C et 125 °C), riche en halite (entre 28 et 22 % en eq. NaCl), en chlorures et en méthane. Ces éléments favoriseraient le transport des métaux dans les trois structures minéralisées en arséniures de Ni, de Co et de Fe. L'importance de l'interaction entre le fluide et la roche dans un environnement riche en halite a été démontré dans plusieurs gisements (supérieurs à 20% de eq. NaCl et 15 % en CaCl<sub>2</sub> eq.) (Seward 1976 ; Warren, 1990 ; Banks et al., 2000 ; Essarraj et al., 2005).

### **c) Source et composition des fluides minéralisateurs**

La présence de halites au sein des serpentinites a été étudiée afin de comprendre l'origine des dépôts de halite dans les marges abyssales (Scribano et al., 2017). La serpentinitisation se formant par processus d'hydratation des minéraux ultramafiques par l'eau de mer. Lors de phénomènes successifs de déshydratation de la serpentinite, l'environnement devient saturé en halite favorisant la formation de cubes de halite et/ou de saumures (LVS) au niveau des bordures de grains, des fractures ou des cavités dans la serpentinite (Sandford, 1981 ; Scribano et al., 2017). Malgré peu de recherches effectuées sur ce sujet, des inclusions fluides saumâtres (LVS) ont été observées dans la serpentinite ainsi qu'expérimentalement (respectivement, Vanko et al., 1992 ; Scambelluri et al., 1997 ; Scribano et al., 2017). Rappelons que nous avons observé et étudié dans la gangue siliceuse des minéralisations

massives et la gangue carbonatée des poches des inclusions LVS et d'inclusions solides riches en halite. Ennaciri et al. (1997) avait également observé des inclusions de halite et des saumures (LVS) dans les quartz des veines du site minier du *Filon 7/5*. Lors de l'exhumation du manteau, le drainage des cubes de halite ou des saumures est favorisé le long de contact permettant les circulations préférentielles des fluides et l'apport de chlorure, ligand nécessaire aux transports des métaux (Co, Ni), est favorisé (Seward et al., 2014).

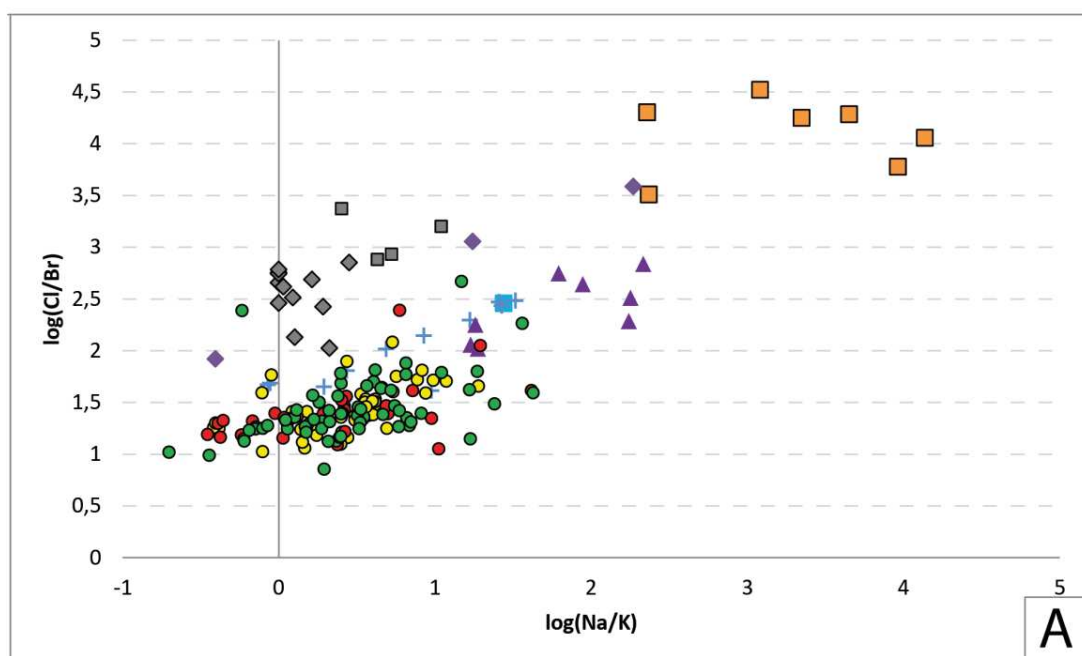
Le Cl et le B sont considérés comme suffisamment conservés dans les fluides salins pour être utilisés dans la détermination de l'origine des saumures (Fontes et Matray, 1993). En effet, le Cl et le B sont concentrés dans l'eau de mer. Ils sont solubles dans les fluides aqueux et incompatibles avec les minéraux mantelliques (Pagé & Hattori, 2019). Ces éléments servent de traceur pour étudier la nature du fluide à l'origine des minéralisations de Bou Azzer. L'origine de la salinité dans les fluides crustaux sera limitée à l'aide des concentrations de Cl et de Br et des ratios Cl vs Br et Na vs Br (par exemple, Banks et al., 2000 ; Walter et al., 1990 ; Yardley et al., 2000) car le Cl et le Br sont incompatibles dans la majorité des silicates et ne participent donc pas aux interactions fluides-roches. Les données d'eau de mer utilisées pour cette étude proviennent de roche du bassin de Paris (d'âge Jurassique) et se trouvent composées de 19350 ppm de Cl et 67 ppm de Br (Fontes et Matray, 1993). Les halites ont des concentrations très riches en Na et en Cl, et pauvres en Br et B (Holser, 1979; Stewart, 1963). Les rapports Cl vs B, Na vs K et Na vs Br diminueront donc dans les saumures formées durant l'évaporation de l'eau de mer. Inversement, ces rapports augmentent dans les fluides lors de la dissolution de la halite comprise dans des lithologies riches en halite par exemple, les évaporites (Cathelineau et al., 2011).

Les inclusions fluides de Bou Azzer ont été comparées, d'après une compilation de données par Li et al. (2015)(Figure VI.20) :

- aux fluides magmatiques (Turekian, 1968 ; Bottrell et Yardley, 1988 ; Hezarkhani, et Williams-Jones, 1998 ; Heinrich et al., 1992, 1999 ; Campbell et al., 1995 ; Kamenetsky et al., 2002 ; Rusk et al., 2004 ; Baker et al., 2006 ; Klemm et al., 2007 ; Audétat et al., 2008 ; Seo et al., 2009, 2012, 2011 ; Drieberg et al., 2013 ; Li et al., 2015),
- aux fluides magmatiques à signature évaporitique (Campbell et al., 1995 ; Audétat et al., 2008 ; Gleeson & Smith, 2009 ; Smith et al., 2013),
- aux fluides sédimentaires (Carpenter et al., 1974 ; Kharaka et al., 1980, 1987 ; Land et al., 1988 ; Connolly et al., 1990 ; Kharaka et Hanor, 2003),
- aux fluides d'eau de mer (Drieberg et al., 2013 ; Turekian, 1968),

- aux fluides d'évaporation d'eau de mer (saumure primaire) (Valyashko, 1956 ; Zherebtsova et Volkova, 1966 ; Ivanov et Voronova, 1972 ; Herrmann et al., 1973 ; Carpenter, 1978 ; McCaffey et al., 1987 ; Nadler et Magaritz, 1980 ; Fontes et Matray, 1993) ;
- aux fluides lessivant des évaporites (Stewart, 1963).

Les rapports logarithmiques entre Cl vs Br, Na vs Br et Na vs K (Figure VI.20A et B, respectivement) devraient permettre d'estimer la nature des fluides amenant les minéralisations de Co et Ni dans les structures étudiées. Le fluide analysé au sein des IFs indique la même origine avec des rapports logarithmiques en Cl vs Br et Na vs K et Na vs Br proches des fluides d'évaporation d'eau de mer (Figure VI.20). Le fluide analysé en Cl vs Br et Na vs K dans les poches poursuit le trend dessiné par les fluides magmatiques et s'éloigne des fluides liés aux minéralisations massives et aux veines (Figure VI.20A et B).



Légende :

Incl. fluides de Bou Azzer	Composition de fluides
— Min. massive	◇ Fluides magmatiques
— Veines	■ Fluides magmatiques à évaporites
— Poches	■ Halites, évaporites
○ IFs LVS	◆ Anhydrites, évaporites
	+ Evaporation d'eau de mer
	▲ Eau de formation sédimentaire
	■ Eau de mer

Figure VI.20A : Diagramme log(Cl vs Br) versus log(Na vs K); ces rapports sont calculés à partir des concentrations en masse (d'après Li et al., 2015)



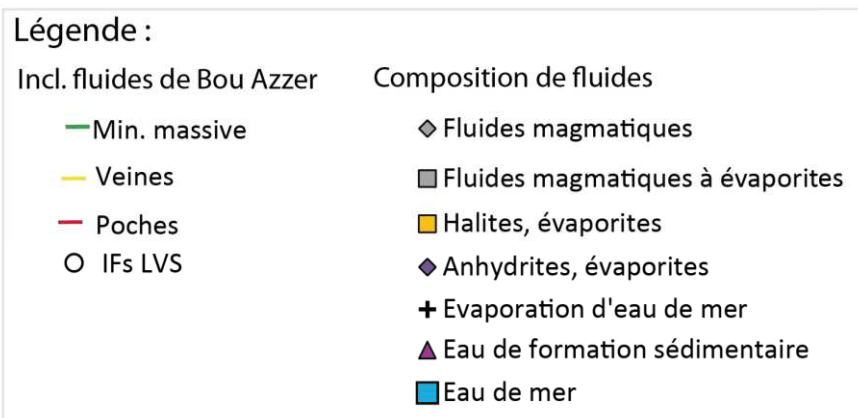
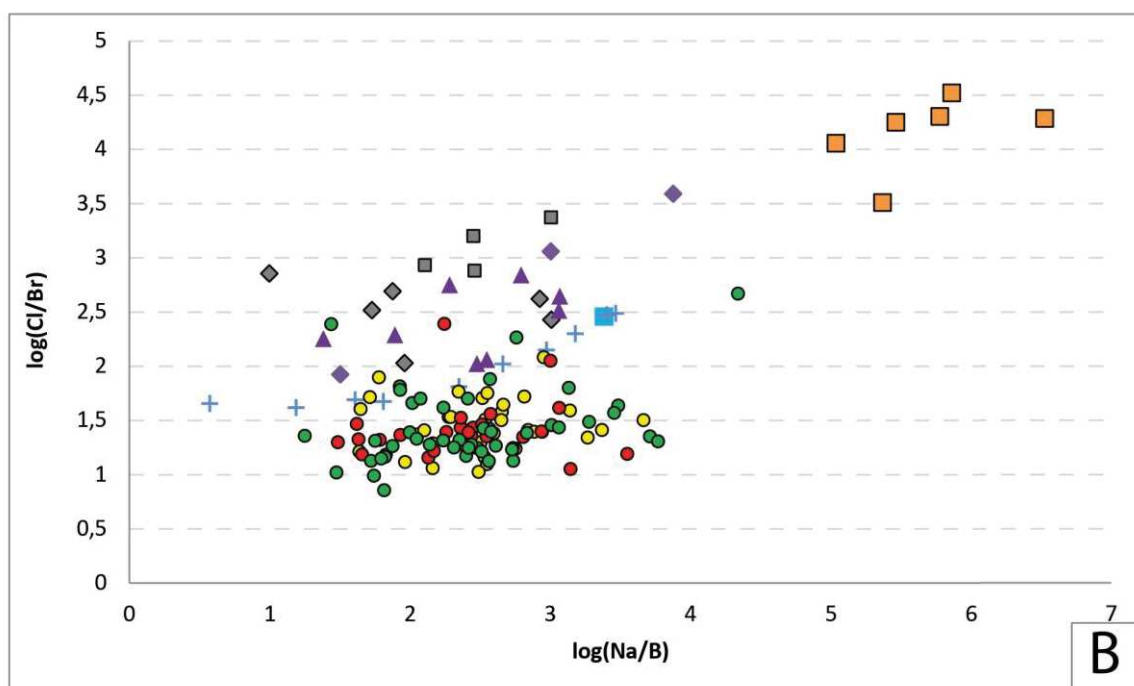


Figure VI.2021B :  $\log(\text{Cl vs Br})$  versus  $\log(\text{Na vs B})$  ; ces rapports sont calculés à partir des concentrations en masse (d'après Li et al., 2015)

McCaffrey et al. (1987) ont défini le trajet de l'évaporation de l'eau de mer en utilisant les rapports élémentaires du Cl / Br, du Na / K et du Na / Br (Figure VI.21). Ce travail a été utilisé afin de caractériser les fluides et les inclusions solides (riches en halite) de Bou Azzer, et de les comparer aux gisements argentifères et cobaltifères présentés ci-dessus, par rapport à la courbe d'évaporation de l'eau de mer (Figure VI.21). Les résultats entre les rapports Cl vs Br vs Na vs Br et Cl vs Br vs Na vs K sont présentés dans la figure VI.21. Les données des inclusions solides (riches en halite) incluses dans la gangue carbonatée des minéralisations massives et siliceuses des poches montrent que le fluide est issu de l'évaporation de l'eau de mer ; ainsi que les données des veines associées au stade argentifère de Bou Azzer (Essarraï et al., 2005). Les données des fluides liés au gisement de Bou Azzer (cette étude et Essarraï et al., 2005) montrent une pente similaire à la courbe d'évaporation de l'eau de mer, d'un demi-ordre de grandeur. Essarraï et al. (2005) explique que le fluide minéralisateur

est un fluide de bassin d'origine évaporitique circulant lors des stades précoces de l'ouverture de l'Atlantique L'hypothèse avancée par ces auteurs ne va pas dans le sens des idées évoquées lors de cette étude, soumettant l'hypothèse que le fluide minéralisateur est de l'eau de mer circulant le long de fractures à proximité du fond marin (Pagé & Hattori, 2019). Quant aux données de la mine argentifère de Zgounder, le fluide pauvre en Cl ne peut pas être lié à l'évaporation de l'eau de mer.

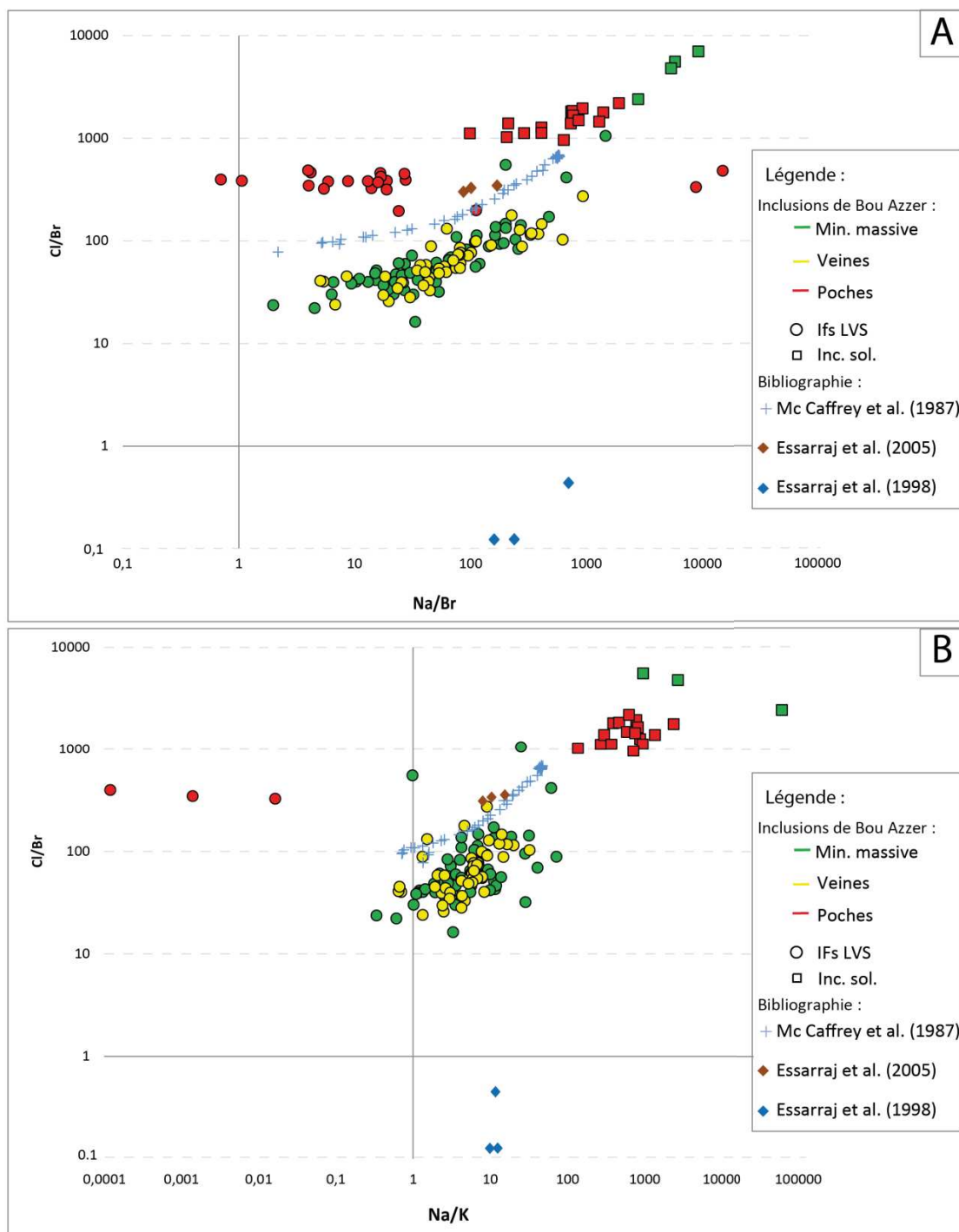


Figure VI.21 : Concentrations mesurées en mmol/L en A) Cl vs Br vs Na vs Br, B) Cl vs Br vs Na vs K, dans les AIFs de LVS, de VL et les inclusions solides riches en halite des différents types de structures de Bou Azzer. Les lignes d'évaporation d'eau de mer (croix bleues) sont issues de McCaffrey et al. (1987)

## 6. Classification et type de gisement

Le gisement de Bou Azzer a été considéré récemment comme un gisement de type « five-element veins » par Kissin (1992), Markl et al. (2016) et Burisch et al. (2017). Le gisement de type « five-element veins » (Bi-Co-Ni-Ag-U) est décrit comme un remplissage de failles caractérisé par une association spécifique de sulfures et d'arséniures de Co-Ni avec de l'Ag natif montrant une texture dendritique caractéristique, de l'As et Bi natif dans une gangue de carbonates. Le Bi est un élément souvent retrouvé sous forme native dans les gisements de type « five-element veins » (Bi-Co-Ni-Ag-U) (district de Jáchymov - Ondrus et al. 2003 ; district de Cobalt – Marshall et al., 1993 ; district de Mackenheim– Burisch et al., 2017). A Bou Azzer, le Bi apparaît sous forme d'inclusions et d'assemblage (Bi-Al-Pb-Au) dans les skuttérodites, les nickélines et les sulfures (*Bouismass* et *Oumlil*). Le gisement de Bou Azzer trouve également des similitudes avec le gisement Cobalt (Ontario) :

- i) la présence de méthane dans les inclusions fluides du dépôt de Co-Gowganda (Kerrick et al., 1986) ;
- ii) deux populations d'inclusions fluides de LVS et de VL qui montrent des températures minimale de piégeage du fluide autour de 290 et 350°C et des pressions minimales entre 4 bars et 43 bars (Figure VI.11) ;
- iii) le gisement de Cobalt, en Ontario (Canada) est un gisement formé dans le système H<sub>2</sub>O-NaCl-CaCl<sub>2</sub>-KCl, aussi observé par Ennaciri et al. (1997).

Cependant, le gisement de Bou Azzer est un cas unique par rapport aux quantités anormalement élevées de Co et As, mais aussi par rapport au lien étroit et systématique qu'il existe entre concentration minérale et serpentinite. Ce gisement peut donc être qualifié comme un dépôt massif d'arséniures de Ni/Co/Fe encaissé au contact entre une serpentinite et une diorite quartzique, initialement composé de fragments précoces de serpentinite, supposée être la source primaire des minéralisations de Co, Ni et As.

## **Chapitre VII : Conclusions et perspectives**



## A. Conclusions générales

Les nouvelles données structurales, texturales, minéralogiques, géochimiques in-situ et inclusions fluides utilisées de manière conjointe dans le cadre de l'étude du gisement de Bou Azzer ont permis de proposer un nouveau modèle de formation pour ce gisement qui restait jusque-là très incompris. Ce modèle confirme que le gisement de Bou Azzer se divise en deux types de minéralisations majeures (à l'exception des occurrences d'argent) que nous avons renommés minéralisations massives, localisées au contact entre une serpentinite et une diorite quartzique, et veines minéralisées contrôlées par des failles globalement NE-SW recoupant la boutonnière de Bou Azzer. La minéralogie commune de ces deux types de minéralisations laisse penser qu'elles ont été formées lors d'un événement continu et progressif. Le premier type est contrôlé par des processus d'invasion hydrothermal particulièrement localisés dans des lentilles de brèches sédimentaires à nombreux fragments de nature ultramafique. Le second type est formé sous l'influence de processus tectoniques en contexte transtensif. Les brèches qui servent de réceptacle aux minéralisations massives sont interprétées comme étant formées le long de détachement à faible pendage pouvant être à l'origine de l'exhumation du manteau et de sa serpentinitisation. Cette interprétation remet en cause le modèle ophiolitique communément accepté pour l'évolution géodynamique du secteur de Bou Azzer.

Les données géochimie in-situ à la fois sur les métaux et les inclusions fluides ainsi que les résultats de la microthermométrie montrent des résultats complexes. Ils démontrent toutefois que la formation des multiples gisements de Bou Azzer s'effectue par circulation, lessivage et remplacement de composants ultramafiques, en accord avec les conclusions de l'étude structurale. Toutefois, l'analyse des inclusions fluides ne montre pas de résultats homogènes et met en évidence un piégeage hétérogène de fluides de plusieurs natures. En accord avec les contraintes structurales et minéralogiques, la minéralisation est le résultat de plusieurs facteurs que l'on peut lister ici :

- Importance de la présence de roches ultramafiques en cours de serpentinitisation, d'exhumation, le tout en contexte d'océanisation dans un bassin arrière-arc ;
- Importance et présence systématique de la diorite quartzique dont le rôle reste difficile à déterminer mais qui laisse penser que l'influence magmatique ne peut être écartée ;
- Prédominance de fluides de saumure dont l'origine et la source restent indéterminées même si plusieurs pistes sont discutées : lien avec la serpentinitisation, présence de bassins sédimentaires ou de bassins océaniques, systèmes volcaniques, ou les trois à la fois.

Ainsi, il apparaît clairement que les multiples gisements Co-Ni de Bou Azzer sont le résultat de la rencontre de plusieurs processus ce qui en fait un district minier singulier et unique qu'il est très difficile de classer. Les nouveaux résultats apportés ici et notamment le rôle des serpentinites, sa localisation en contexte de petits bassins océaniques formé par hyper-extension en arrière arc, son lien spatial et certainement génétique avec des épisodes magmatiques laissent penser que les dépôts de Bou

Azzer peuvent être assimilés comme un gisement de type « Serpentine Hosted Massive Arsenides » dont le mode de formation est proche de celui des Volcanic-Hosted-Massive-Sulfides » mais avec une différence majeure : la présence et l'intégration de serpentinites dans le système.

## **B. Perspectives d'étude**

Ce travail de recherche a permis de caractériser la complexité des circulations de fluides aux abords des contacts faillés et des structures extensives du gisement de Co-Ni de Bou Azzer, i.e. les minéralisations massives, les veines et les poches. La caractérisation du fluide établie selon l'évolution paragéométrique des minéralisations et des différentes structures n'est pourtant pas terminée. Plusieurs points d'intérêts sont évoqués ci-dessous pour une meilleure compréhension des unités géologiques de la boutonnière, sur d'éventuelles idées de projets de modélisation micro-géochimique et physique des minéralisations ou encore, des avancées sur la source de l'argent et de l'arsenic.

- La caractérisation de « end-members » (ou de « fluides de référence ») permettra de créer une base de données des fluides d'origine plutonique, sédimentaire ou volcanique, en étudiant les roches encaissantes des minéralisations telles que la diorite quartzique, la serpentinite ou les roches volcaniques précambriennes. Le fluide inclus dans les quartz de la diorite quartzique pourrait être utilisé et représenterait le « end-member » plutonique. Les pyrites des roches volcaniques précambriennes du Supergroupe de Ouarzazate effectueraient un objet indispensable à la caractérisation du « end-member » volcanique de Bou Azzer. Kouzmanov et al. (2002) ont caractérisé par analyse infra-rouge des inclusions fluides dans des pyrites afin d'étudier l'origine du fluide minéralisateur. La possibilité de trouver des inclusions exploitables dans la serpentinite est très faible. L'idée de faire des analyses en infra-rouge dans les spinelles pourrait définir la serpentinite comme le « end-member » ultramafique de Bou Azzer.
- La détermination des vitesses et des directions de circulation des paléo-fluides poursuivrait le travail pétro-structural et textural établi sur les phases cristallines. Les objets automorphes et décimétriques tels que les quartz des différentes structures de Bou Azzer feraient de parfaits objets en y mesurant la dissymétrie des faces minéralogiques sur lame orientée (Sizaret et al. 2009). Un modèle conceptuel des directions et des variations de vitesses dans le temps et dans l'espace accompagné des données de pressions, de températures, de salinité et des concentrations obtenues lors de ce projet de recherche pourrait être réalisé au travers du logiciel COMSOL Multiphysics® en simulant différents processus en se basant sur des paramètres acquis tels que la température, les vitesses, les directions de circulation, les pressions, les salinité, la densité du fluide, ...
- L'étude de la composition isotopique du carbone au sein des carbonates permettrait de remonter à la source du carbone (e.g., eau de mer, eau météorique, fluide issu de la déshydratation de sédiments). L'étude de la composition isotopique en oxygène au sein des

---

carbonates permettrait de remonter aux températures de précipitation de la phase minérale et la source des fluides (e.g., eau de mer, eau météorique, fluide issu de la déshydratation de sédiments). L'étude isotopique du soufre pourrait être menée sur les minéralisations d'intérêt économique tels que les arséniures de Co, de Ni, de Fe et les sulfures.

- Incorporer le gisement argentifère de Bou Azzer dans la séquence de mise en place des minéralisations nickélifères et cobaltifères de Bou Azzer permettrait de répondre à nos questions quant à la place de l'argent à Bou Azzer. Les travaux effectués par Leblanc & Lbouabi (1988), Ennaciri et al. (1998) et Essaraj et al. (2005) montrent deux histoires différentes quant à l'origine du fluide amenant les minéralisations argentifères de Bou azzer : une hypothèse de fluides de bassins associée à l'ouverture de l'atlantique et une hypothèse panafricaine.
- L'histoire de la diorite quartzique associée aux minéralisations cobaltifères et nickélifères de Bou Azzer est très mal contrainte par rapport au complexe ultramafique de Bou Azzer et aux minéralisations. Des questions se posent sur le timing de mise en place de la diorite quartzique de Bou Azzer. Nous avons discuté des contacts intrusifs de la diorite dans les dykes basiques du complexe ultramafique de Bou Azzer. La formation de la diorite quartzique serait-elle synchrone de l'exhumation du manteau serpentinisé, synchrone de la suprasubduction formant les roches d'arc de Bougmane, ou antérieure à toutes ces unités et mise à l'affleurement lors de l'exhumation remontant la serpentinite à la surface ? La datation en U-Pb de sa mise en place centrée sur les apatites ou les rares zircons présents dans la roche permettrait de contraindre son âge de mise en place, car l'étude géochronologique menée lors de ce travail n'a pas pu contraindre la mise en place de cette diorite quartzique.
- L'origine de l'arsenic est encore discutée à Bou Azzer. Les hypothèses sont multiples : les roches volcaniques du Supergroupe de Ouarzazate, les sulfures, les oxydes ou encore les spinelles encaissés dans la serpentinite et les apatites dans la diorite quartzique. Si la caractérisation de l'origine de l'arsenic est possible, il serait intéressant de connaître la ou les sources de cet élément. Le système isotopique de l'arsenic ne permet pas d'effectuer des mesures isotopiques car l'arsenic n'a qu'un seul isotope stable de masse 75. Il serait alors intéressant d'étudier avec précision les teneurs en arsenic dans les roches encaissantes des minéralisations.





## Références bibliographiques

### A

- Abouchami, W., Boher, M., Michard, A., Albarède, F., 1990. A major 2.1 Ga old event of mafic magmatism in West Africa: an early stage of crustal accretion. *J. Geophys. Res.* V. 95, p. 17605–17629.
- Admou, A., Razin, Ph., Egal, E., Youbi, N., Soulimani, A., Blein, O., Chèvre-Mont, Ph., Gasquet, D., Barbanson, L., Bouabdelli, M., Anzar-Conseil, 2013, Notice explicative, carte géol. Maroc (1/50000). Notes et Mémoires Serv. Géol. Maroc N°533bis, MEM/BRGM, carte géologique par Admou, A., Fekkak, A., Razin, Ph., Egal, E., Youbi, N., Soulimani, A., Blein, O., Baudin, T., Chèvre-Mont, Ph. (2013)
- Aerden D. G. A. M., 1991. Foliation-boudinage control on the formation of the Rosebery Pb-Zn orebody, *Tasmania Journal of Structural Geology*, v 13 (7), p 759-775,
- Aerden D. G. A. M., 1993. Formation of Massive Sulfide Lens and Replacement of Folds: The Hercules Pb-Zn Mine, *Tasmania Economic Geology*, v. 88, p. 377-396
- Ahmed, A.H., Arai, S., Abdel-aziz, Y.M., Ikenne, M., Rahimi, A., 2009a. Platinum-group elements distribution and spinel composition in podiform chromitites and associated rocks from the upper mantle section of the Neoproterozoic Bou Azzer ophiolite. *Journal of African Earth Sciences*, v. 55, p. 92–104. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2009.02.005>
- Ahmed, A. H., Arai, S., Ikenne, M., 2009b. Mineralogy and paragenesis of the Co-Ni arsenides ores of Bou Azzer, Anti-Atlas, Morocco: *Econ. Geol.*, v. 104, p. 249–266.
- Aït Malek, H., Gasquet, D., Bertrand, J.-M., Leterrier, J., 1998. Géochronologie U-Pb sur zircon de granitoïdes éburnéens et panafricains dans les boutonnières protérozoïque d'Igherm, du Kerdous et du Bas Drâa (Anti-Atlas occidental, Maroc). *Earth & Planetary Sciences*, v. 327, p. 819–826.
- Alderton D H M, Pearce J A and Potts P J 1980 Rare earth element mobility during granite alteration: evidence from southwest England. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 49, p. 149-165.
- Arndt, N.T., Leshner, C.M., Czamanske, G.K., 2005. Mantle-derived magmas and magmatic Ni-Cu-(PGE) deposits, in: Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., Richard, J.P. (Eds.), *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, p. 5-23.

Atkinson A.B., 2002. A model for the PTX properties of H<sub>2</sub>O–NaCl. Unpublished M.Sc. Thesis, Virginia Tech, Blacksburg, 133 p.

Audétat, A., Pettke, T., Heinrich, C.A. and Bodnar, R.J., 2008. Special Paper: The Composition of Magmatic-Hydrothermal Fluids in Barren and Mineralized Intrusions. *Economic Geology*, v. 103(5), p. 877-908.

## **B**

Baker, T., Ebert, S., Rombach, C. and Ryan, C.G., 2006. Chemical Compositions of Fluid Inclusions in Intrusion-Related Gold Systems, Alaska and Yukon, Using PIXE Microanalysis. *Economic Geology*, v. 101(2), p. 311-327.

Barbey, P., Oberli, F., Burg, J.P., Nachit, H., Pons, J., Meier, M., 2004. The Palaeoproterozoic in western Anti-Atlas (Morocco): A clarification. *Journal of African Earth Sciences*, v. 39, p. 239–245. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2004.07.044>

Bastin, E.S., 1939. The nickel-cobalt-native silver ore type. *Econ. Geol.*, v. 34, p. 1-40.

Baur, W.H., & Onishi, B.-M.H., 1969, Arsenic, In: Wedepohl, K.H. (Ed) *Handbook of Geochemistry*. Springer-Verlag, Berlin, p. 33-A-1–33-0-5.

Benbrahim, M., Aissa, M., 2005. Le gisement aurifère d' Iourirn ( boutonnière de Tagragra d' Akka , Anti- Atlas occidental , Maroc ): un exemple de minéralisation mésothermale dans les formations paléoproterozoïques. *Sciences-New York*, p. 41–46.

Beraaouz, E. H., Ikenne, M., Mortaji, A., Madi, A., Lahmam, M., Gasquet, D., 2004, Neoproterozoic granitoids associated with the Bou-Azzer ophiolitic melange (Anti-Atlas, Morocco): Evidence of adakitic magmatism in an arc segment at the NW edge of the West-African craton: *Journal of African Earth Sciences*, v. 39, p. 285–293.

Blein, O., Baudin, T., Chèvremont, P., Soulaïmani, A., Admou, H., Gasquet, P., Cocherie, A., Egal, E., Youbi, N., Razin, P., Bouabdelli, M., Gombert, P., 2014. Geochronological constraints on the polycyclic magmatism in the Bou Azzer-El Graara inlier (central Anti-Atlas Morocco). *Journal of African Earth Sciences*, v. 99, p. 287–306. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2014.04.021>

Bodinier, J. L., Dupuy, C., and Dostal, J., 1984. Geochemistry of Precambrian ophiolites from Bou Azzer, Morocco: Contributions to Mineralogy and Petrology, v. 87, p. 43–50. <https://doi.org/10.1007/BF00371401>

- Bodnar, R.J., Reynolds, T.J., Kuehn, C.A., 1985. Fluid-inclusion systematics in epithermal systems. *Reviews in Economic Geology*, v. 2, p. 73–97.
- Bodnar, R.J., Vityk, M.O., 1994. Interpretation of microthermometric data for H<sub>2</sub>O– NaCl fluid inclusions. In: de Vivo, B., Frezzotti, M.L. (Eds.), *Fluid Inclusions in Minerals, Methods and Applications*. Blacksburg, p.117–130.
- Boillot, G., Recq, M., Winterer, E.L., Meyer, A.W., Applegate, J., Baltuck, M., Bergen, J.A., Comas, M.C., Davies, T.A., Dunham, K., Evans, C.A., Girardeau, J., Goldberg, G., Haggerty, J., Jansa, L.F., Johnson, J.A., Kasahara, J., Loreau, J.P., Luna-Sierra, E., Moullade, M., Ogg, J., Sarti, M., Thurow, J., Williamson, M., 1987. Tectonic denudation of the upper mantle along passive margins: a model based on drilling results (ODP leg 103, western Galicia margin, Spain). *Tectonophysics*, v. 132, p. 335-342.
- Bonatti E, Emiliani C, Ferrera G, Honnorez J, Rydell H. ,1974. Ultramafic carbonate breccias from the equatorial Mid-Atlantic Ridge. *Mar Geol*, v. 16, p. 83–102.
- Borisenko, A. S., Lebedev, V. I., Borovikov, A. A., Pavlova, G. G., Kalinin, Y. A., Nevol'ko, P. A., Kostin, A. V., 2014, Forming Conditions and Age of Native Silver Deposits in Anti-Atlas (Morocco). *Doklady Earth Sciences*, v. 456, p. 663–666.
- Bottrell, S.H. & Yardley, B., 1988. The composition of a primary granite-derived ore fluid from SW England, determined by fluid inclusion analysis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 52(2), p. 585-588.
- Bouchta, R., Boyer, F., Routhier, P., Saadi, M., Salem, M., 1977. L'aire cuprifère de l'Anti-Atlas (Maroc) : Permanence et arêtes riches : C. R. Acad. Sc. Paris, v. 284, p. 503–506.
- Bouougri, E.H., Saquaque, A., 2004. Lithostratigraphic framework and correlation of the Neoproterozoic northern West African Craton passive margin sequence (Siroua-Zenaga-Bouazzer Elgraara Inliers, Central Anti-Atlas, Morocco): An integrated approach. *Journal of African Earth Sciences*. v. 39, p. 227-238. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2004.07.045>
- Bourque, H., Barbanson, L., Sizaret, S., Branquet, Y., Ramboz, C., 2014, Copper Mineralisation in Adoudounian Cover of the Bou Azzer-El Graara (Anti Atlas, Morocco): Tectono- Stratigraphic Controls, Conference: 13th SGA biennial meeting, p. 4.
- Bourque, H., Barbanson, L., Sizaret, S., Branquet, Y., Ramboz, C., Ennaciri, A., El Ghorfi, M., Badra, L., 2015. A contribution to the synsedimentary versus epigenetic origin of the Cu mineralizations hosted by terminal Neoproterozoic to Cambrian formations of the Bou Azzer-El Graara inlier: New insights from the Jbel Laassel deposit (Anti Atlas, Morocco). *Journal of African Earth Sciences*, v. 107, p. 108-118. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.04.005>

- Bousquet, R., Mamoun, R. El, Saddiqi, O., Goffé, B., Ller, A.M., Madi, A., 2008. Mélanges and ophiolites during the Pan-African orogeny: the case of the Bou-Azzer ophiolite suite (Morocco). *The Geological Society of London*, v. 297, p. 233-247. <https://doi.org/10.1144/SP297.11>
- Brun, J.P. & Besler, O., 1996. Mantle exhumation at passive margins. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 142, p. 161-173
- Burisch, M., Gerdes, A., Walter, B. F., Neumann, U., Fettel, M., & Markl, G. (2017). Methane and the origin of five-element veins: Mineralogy, age, fluid inclusion chemistry and ore forming processes in the Odenwald, SW Germany. *Ore Geology Reviews*, v. 81, p. 42–61. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.10.033>
- Burkhard, M., Caritg, S., Helg, U., Robert-Charrue, C., Soulaïmani, A., 2006. Tectonics of the Anti-Atlas of Morocco. *C. R. Geosci.*, v. 338, p. 11-24.
- Butt, C.R.M., Cluzel, D., 2013. Nickel Laterite Ore Deposits: Weathered Serpentinites. *Elements*, v. 9, p. 123-128.

## C

- Caby, R., 2014. Nature and evolution of Neoproterozoic ocean-continent transition: Evidence from the passive margin of the West African craton in NE Mali. *Journal of African Earth Sciences*, v. 91, p. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2013.11.004>
- Cailteux, J.L.H., Kampunzu, A.B., Lerouge, C., Kaputo, A.K., Milesi, J.P., 2005. Genesis of sediment-hosted stratiform copper – cobalt deposits , central African Copperbelt. *Journal of African Earth Sciences*, v. 42, p. 134–158. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2005.08.001>
- Campbell, A.R., Banks, D.A., Phillips, R.S. and Yardley, B.W.D., 1995. Geochemistry of Th-U-REE mineralizing magmatic fluids, Capitan Mountains, New Mexico. *Economic Geology*, v. 90(5), p. 1271-1287.
- Canil, D. 2002. Vanadium in peridotites, mantle redox and tectonic environments: Archean to present. *Earth and Planetary Science Letters*, 195, 75–90
- Canat, M., 1993. Emplacement of mantle rocks in the seafloor at mid-ocean ridges. *J. Geophys. Res.-Solid Earth*, v. 98, p. 4163-4172.
- Caritg, S., Burkhard, M., Ducommun, R., Helg, U., Kopp, L., Sue, C., 2004. Fold interference patterns in the Late Palaeozoic Anti-Atlas belt of Morocco. *Terra nova*, v. 16, p. 27–37. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2003.00525.x>

- Carpenter, A.B., 1978. Origin and chemical evolution of brines in sedimentary basins. In: K.S.A.R. Johnson (ed.), Thirteenth Annual Forum on the Geology of Industrial Minerals. Oklahoma Geological Survey Circular, p. 60-77.
- Carpenter, A.B., Trout, M.L. and Pickett, E.E., 1974. Preliminary Report on the Origin and Chemical Evolution of Lead-and Zinc-Rich Oil Field Brines in Central Mississippi. *Economic Geology*, v. 69 (8), p. 1191-1186.
- Charlot, R., 1978. Caractérisation des événements éburnéens et panafricains dans l'Anti-Atlas marocain. Apport de la méthode géochronologique Rb–Sr. *Notes Mém. Serv. Géol. Maroc*, v. 313, 106p.
- Chernov, A.A., 1984, *Modern Crystallography III. Crystal growth*: Verlag Berlin Heidelberg, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 488 p.
- Chèvremont, Ph., Blein, O., Razin, Ph., Baudin, T., Barbanson, L., Gasquet, D., Soulimani, A., Admou, H., Youbi, N., Bouabdelli, M, ANZAR-Conseil, 2013, Notice explicative carte géol. Maroc (1/50 000), feuille Bou Azer, *Notes et Mémoires Serv. Géol. Maroc*, N°535 bis, MEM/BRGM. Carte géologique par Blein, O., Chèvremont, Ph., Razin, Ph., Baudin, T., Gasquet, D. (2013).
- Choubert, G., 1945, Sur le Précambrien marocain: *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, v. 221, p. 249-251.
- Choubert, G., 1963a, Histoire géologique du Précambrien de l'Anti-Atlas : *Notes Mem. Serv. Géol. Maroc*, v. 162, 352 p.
- Choubert, G., Faure-Muret, A., 1980. 1. Anti-atlas (Morocco). *Earth-Science Reviews*, v. 16, p. 87-113
- Chukanov, N.V., Pekov, I.V., Zadov, A.E., and Semenov, E.I., 2002. Kuzmenkoite-Zn,  $K_2Zn(Ti,Nb)_4(Si_4O_{12})_2(OH,O)_4 \cdot 6-8H_2O$ , a new mineral of the labuntsovite group from the Lovozevo massif, Kola Peninsula. *Proceedings of the Russian Mineralogical Society*, v. 131, p. 45-50. (in Russian).
- Clauer, N., 1976, Géochimie isotopique du strontium des milieux sédimentaires – application à la géochronologie de la couverture du craton Ouest-Africain: *Sci. Géol. Mém.*, v. 45, 256 p.
- Clerc, C., Lagabrielle, Y., Neumaier, M., Reynaud, J-Y., Saint-Blanquat, M., 2012. Exhumation of subcontinental mantle rocks: evidence from ultramafic-bearing clastic deposits nearby the Lherz peridotite body, French Pyrenees. *Bulletin de La Societe Geologique de France*, v. 183 (5) , p. 443–459.

- Cochrane, R., Spikings, R.A., Chew, D., Wotzlaw, J.-F., Chiaradia, M., Tyrrell, S., Schaltegger, U., and Van der Lelij, R., 2014. High temperature (>350 °C) thermochronology and mechanisms of Pb loss in apatite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 127, p. 39–56.
- Connolly, C.A., Walter, L.M., Baadsgaard, H. and Longstaffe, F.J., 1990. Origin and evolution of formation waters, Alberta Basin, Western Canada sedimentary Basin. I. Chemistry. *Applied Geochemistry*, v. 5(4), p. 375-395.
- Coogan, L. A., R. R. Parrish, and N. M. Roberts (2016), Early hydrothermal carbon uptake by the upper oceanic crust: Insight from in situ U-Pb dating. *Geology*, v. 44, p. 147-150.
- Cortesogno, L., Galbiati, B., Principi, G., 1981. Descrizione dettagliata di alcuni caratteristici affioramenti di breccie serpentinite della Liguria orientale ed interpretazione chiave geodinamica. *Ophioliti*, v.6, p. 47–76.

## **D-E**

- D’Lemos, R.S., Inglis, J.D., Samson, S.D., 2006. A newly discovered orogenic event in Morocco: Neoproterozoic ages for supposed Eburnean basement of the Bou Azzer inlier, Anti-Atlas Mountains., v. 147, p. 65-78. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.02.003>
- Davy, R. G., T. A. Minshull, G. Bayrakci, J. M. Bull, D. Klaeschen, C. Papenberg, T. J. Reston, D. S. Sawyer, and C. A. Zelt (2016), Continental hyperextension, mantle exhumation, and thin oceanic crust at the continent-ocean transition, West Iberia: New insights from wideangle seismic, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, v. 121, 23 p. doi:10.1002/2016JB012825.
- De Wall, H., Kober, B., Errami, E., Ennih, N., Greiling, R.O., 2001. Age de mise en place et context géologique des granitoïdes de la boutonnière d’Imiter (Saghro oriental, Anti-Atlas, Maroc): 2ème Colloque International. 3M :Magmatisme, Métamorphisme et Minéralisations Associées, Marrakech, v. 10–12, 19 p.
- Deschamps, F., Godard, M., Guillot, S., Hattori, K., 2013. Geochemistry of subduction zone serpentinites: A review. *Lithos*, v. 178, p. 96-127.
- Dietrich, V., Vuagnat, M., Bertrand, J., 1974. Alpine metamorphism of mafic rocks. *Schweiz Mineral Petrogr Mitt*, v. 54, p. 291–323.
- Dolansky, L.M., 2007. Controls on the genesis of hydrothermal cobalt mineralization: insights from the mineralogy and geochemistry of the Bou Azzer deposits, Morocco. Thesis, McGill University, Montreal, QC, Canada, 130 p.

- Dong, G., Morrison, G., Jaireth, S., 1995. Quartz textures in epithermal veins, Queensland; classification, origin and implication. *Economic Geology*, v. 90 (6), p. 1841–1856.
- Drieberg, S.L. et al., 2013. The Interplay of Evolved Seawater and Magmatic-Hydrothermal Fluids in the 3.24 Ga Panorama Volcanic-Hosted Massive Sulfide Hydrothermal System, North Pilbara Craton, Western Australia. *Economic Geology*, v. 108(1), p.79-110.
- El Ali, A., Barbin, G., Cervelle, B., Ramseyer, K. & Bouroulec, J., 1993. Mn<sup>2+</sup>-activated luminescence in dolomite, calcite and magnesite: Quantitative determination of manganese and site distribution by EPR and CL spectroscopy. *Chemical Geology*, v. 104, p. 189–202.
- El Aouli, E.H., Gasquet, D., Ikenne, M., 2001. Le magmatisme basique de la boutonnière d'Igherm (Anti-Atlas occidental, Maroc) : un jalon des distensions néoprotozoïques sur la bordure nord du craton ouest-africain. *Bull Soc géol*, v. 172, p. 309–317.
- El Ghorfi, M., Oberthür, T., Lüders, V., El Boukhari, A., Melcher, F., Maacha, L., Ziadi, R., Baoutoul, H., 2006, Gold–palladium mineralization at Bleïda Far West, Bou Azzer–El Graara Inlier, Anti-Atlas, Morocco. *Mineralium Deposita*, v. 41, p.549-564
- El Hadi, H., Simancas, J.F., Martínez-Poyatos, D., Azor, A., Tahiri, A., Montero, P., Fanning, C.M., Bea, F., González-Lodeiro, F., 2010. Structural and geochronological constraints on the evolution of the Bou Azzer Neoproterozoic ophiolite (Anti-Atlas, Morocco). *Precambrian Research*, v. 182, p. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2010.06.011>
- Ennaciri, A., 1995, Contribution à l'étude du district à Co, As, (Ni, Au, Ag) de Bou Azzer, Anti-Atlas (Maroc). Données minéralogiques et géochimiques : Etude des inclusions fluides : Unpublished M.Sc. thesis, Université d'Orléans, 238 p.
- Ennaciri, A., Barbanson, L., Lancelot, J., and Touray, J.C., 1996, Distribution et âge de mise en place des minéralisations aurifères du district de Bou Azzer) (Anti-Atlas, Maroc) [ext. abs.l: Réunion des Sciences de la Terre, 16th, Orléans, 1996, Extended Abstracts, 153 p.
- Ennaciri, A., Barbanson, L., Touray, J. C., 1997, Brine inclusions from the Co-As(Au) Bou Azzer district, Anti-Atlas mountains, Morocco: *Economic Geology*, v. 92, p. 360–367.
- Ennaciri, A., Barbanson, L., Touray, J.C., 1995b, Mineralised hydrothermal solution cavities in the Co-As Aït Ahmane mine (Bou Azzer, Morocco): *Mineralium Deposita*, v. 30, p. 75- 77.
- Ennih, N., & Liegeois, J.-P., 2003. The Moroccan Anti-Atlas : the West African craton passive margin with limited Pan-African activity . Implications for the northern limit of the craton : reply to comments by E.H. Booufri. *Precambrian Research*, v. 120, p. 185–189.



- Ennih, N., Liégeois, J., 2001. The Moroccan Anti-Atlas : the West African craton passive margin with limited Pan-African activity . Implications for the northern limit of the craton. *Precambrian Research* 112, 289–302.
- Ennih, N., Liegeois, J.-P., 2008. The Boundaries of the West African Craton. Geological Society, London, Special Publications, v. 297, p. 1–17. <https://doi.org/10.1144/SP297.1>
- Epp, D. & Suyenaga, W., 1978. Thermal contraction and alteration of the oceanic crust. *Geology*, v.6 p726-728.
- Essarraj, S., Boiron, M.C., Cathelineau, M., Banks, D.A., Benharref, M., 2005. Penetration of surface-evaporated brines into the Proterozoic basement and deposition of Co and Ag at Bou Azzer (Morocco): Evidence from fluid inclusions. *Journal of African Earth Sciences*, v. 41, p. 25-39. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2005.03.001>
- Essarraj, S., Boiron, M.C., Cathelineau, M., Tarantola, A., Leisen, M., Boulvais, P., Maacha, L., 2016. Basinal brines at the origin of the Imiter Ag-Hg deposit (Anti-Atlas, Morocco): Evidence from LA-ICP-MS data on fluid inclusions, halogen signatures, and stable isotopes (H, C, O). *Economic Geology*, v. 111, p. 1753–1781. <https://doi.org/10.2113/econgeo.111.7.1753>

## F-G

- Fanlo, I., Gervilla, F., Colás, V., Subías, I., 2015. Zn-, Mn- and Co-rich chromian spinels from the Bou-Azzer mining district ( Morocco ): Constraints on their relationship with the mineralizing process. *Ore Geology Reviews*, v. 71, p. 82–98. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.05.006>
- Fontes, J.C. & Matray, J.M., 1993. Geochemistry and origin of formation brines from the Paris Basin, France: 1. Brines associated with Triassic salts. *Chemical Geology*, v. 109(1–4), p. 149-175.
- Francis, T.J.G. 1981, serpentinization faults and their role in the tectonics of slow spreading ridges, *journal of geophysical research*, v.86, p 11616-11622.
- Freyssinet, P., Butt, C.R.M., Morris, R.C., Piantone, P., 2005. Ore-forming processes related to lateritic weathering, in: Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., Richard, J.P. (Eds.), *Economic Geology 100th Anniversary Volume*. Society of Economic Geologists, Inc, Littleton, Colorado, pp. 681-722.
- Frizon de Lamotte, D., Zizi, M., Missenard, Y., Hafid, M., El Azzouzi, M., Maury, R.C., Charrière, A., Taki, Z., Benammi, M., and Michard, A., 2008, The Atlas system in Michard, A., Saddiqi, O., Chalouan, A., and Frizon de Lamotte, D., eds., *Continental evolution: The geology of*

- Morocco— structure, stratigraphy, and tectonics of the Africa-Atlantic-Mediterranean Triple Junction: Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, p. 133–202.
- Froitzheim, N., Manatschal, G., 1996. Kinematics of Jurassic rifting, mantle exhumation, and passive margin formation in the Austroalpine and Penninic nappes (eastern Switzerland). *Geological Society of America Bulletin*, v. 1087, p. 1120–1133.
- Gahlan, H., Arai, S., Ahmed, A.H., Ishida, Y., Abdel-Aziz, Y.M., and Rahimi, A., 2006, Origin of magnetite veins in serpentinite from the Late Proterozoic Bou-Azzer ophiolite, Anti-Atlas, Morocco: An implication for mobility of iron during serpentinisation: *Journal of African Earth Sciences*, v. 46, p. 318–330.
- Gasquet, D., Chevremont, P., Baudin, T., Chalot-Prat, F., Guerrot, C., Cocherie, A., Roger, J., Hassenforder, B., Cheilietz, A., 2004. Polycyclic magmatism in the Tagragra d’Akka and Kerdous-Tafeltast inliers (Western Anti-Atlas, Morocco). *Journal of African Earth Sciences*, v. 39, p. 267–275. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2004.07.062>
- Gasquet, D., Ennih, N., Liégeois, J.P., Soulaïmani, A., Michard, A., 2008. The pan-African belt. *Lect. Notes Earth Sci.*, v. 116, p. 33–64. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-77076-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-540-77076-3_2)
- Gasquet, D., Levresse, G., Cheilietz, A., Azizi-Samir, M.R., Mouttaqi, A., 2005, Contribution to a geodynamic reconstruction of the Anti-Atlas (Morocco) during Pan-African times with the emphasis on inversion tectonics and metallogenic activity at the Precambrian-Cambrian transition: *Precambrian Research*, v. 140, p. 157-182.
- Gasquet, D., Levresse, G., Cheilietz, A., Azizi-Samir, M.R., Mouttaqi, A., 2005b. Contribution to a geodynamic reconstruction of the Anti-Atlas (Morocco) during Pan-African times with the emphasis on inversion tectonics and metallogenic activity at the Precambrian-Cambrian transition. *Precambrian Research*, v. 140, p. 157-182. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2005.06.009>
- Gasquet, D., Roger, J., Chalot-Prat, F., Hassenforder, B., Baudin, T., Chevremont, P., A. Razin., Benlakhdim, Mortaji, A. & Benssaou, M., 2001. Mémoire explicatif, Carte géol. Maroc (1/50.000), Feuille Tamzrar. *Notes Mém. Serv. Géol. Maroc.*, 415 p.
- Gavrilenko, B.V., Bakushkin, E.M., Balaganskaya, E.G., Efimov, A.A., Kochagin, A.U., Skiba, V.I., Shpachenko, A.K., and Grokhovskaya, T.L., 2002, Precious metals in rocks and ores from intrusive complexes of Kola Peninsula: *Proceedings of the Russian Mineralogical Society*, v. 131, p. 9–18.
- Gervilla, F., Fanlo, I., Colas, V., Subias, I., 2012. Mineral composition and phases relation of Ni – Co – Fe arsenides ores from the Aghbar mine, Bou Azzer, Morocco. *The Canadian Mineralogist*, v. 50, p. 447–470.

- Gianelli, G., Principi, G., 1977. Northern Apennine ophiolite: an ancient transcurrent fault zone. *Bolletino della Societa Geologica Italiana*, v. 96, p. 53–58.
- Gleeson, S.A. & Smith, M.P., 2009. The sources and evolution of mineralising fluids in iron oxide–copper–gold systems, Norrbotten, Sweden: Constraints from Br/Cl ratios and stable Cl isotopes of fluid inclusion leachates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 73(19), p. 5658–5672.
- Goldstein, R.H. & Reynolds, T.J., 1994. Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals. Short Course 31, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Tulsa, 199 p.
- Götze, J. & Kempe, U., 2008. A comparison of optical microscope ~OM! and scanning electron microscope (SEM) based cathodoluminescence (CL) imaging and spectroscopy applied to geosciences. *Mineral Mag*, v. 72, p. 909–924.
- Gouloubinow, R., 1956. Prospection geochemique du cobalt a Bou Azzer. *Sci. Terre*, Nancy, 4 p.
- Guillot, S., Hattori, K., Agard, P., Schwartz, S., Vidal, O., 2009. Exhumation processes in oceanic and continental subduction contexts: a review. In: Lallemand, S., Funiciello, F. (Eds.), *Subduction Zone Geodynamics (Frontiers in Earth Sciences)*. Springer Berlin, Heidelberg, p. 175–205.

## **H-I-J-K**

- Habermann, D., Götze, J., Neuser, R. & Richter, D.K., 1997. The phenomenon of intrinsic cathodoluminescence: Case studies of quartz, calcite and apatite. *Zentralbl Geol Paläont Teil 1, Heft*, v. 10–12, p. 1275–1284.
- Halls, C., & Stumpfl, E.F., 1972. The five-element (Ag-Bi-Co-Ni-As) vein deposit – A critical appraisal of the geological environments in which it occurs and of the theories affecting its origin. *Proceedings, 24th International Geological Congress, Montreal, Sec. 4*, p. 540.
- Hart, S. R., & Davis, K. E., 1978, Nickel partitioning between olivine and silicate melt: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 40, p. 203–219.
- Hattori, K.H., Guillot, S., Saumur, B.M., Tubrett, M.N., Vidal, O., Morfin, S., 2010. Corundum-bearing garnet peridotite from northern Dominican Republic: A metamorphic product of an arc cumulate in the Caribbean subduction zone. *Lithos*, v. 114, p. 437–450.
- Hattori, K.H., Guillot, S., 2003. Volcanic fronts as a consequence of serpentinites dehydration in the fore-arc mantle wedge. *Geology*, v. 31, p. 525–528.

- Heaman, L.M., 2009. The application of U–Pb geochronology to mafic, ultramafic and alkaline rocks: an evaluation of three mineral standards. *Chem Geol.*, v. 261, p. 43–52.
- Hefferan, K.P., Karson, J.A., Saquaque, A., 1992. Proterozoic collisional basins in a Pan-African suture zone, Anti-Atlas mountains, Morocco. *Precambr. Res.*, v. 54, p. 295–319.
- Hefferan, K.P., Admou, H., Karson, J.A., Saquaque, A., 2000. Anti-Atlas (Morocco) role in Neoproterozoic Western Gondwana reconstruction. *Precambrian Research*, v. 103, p. 89–96.
- Hefferan, K., Admou, H., Hilal, R., Karson, J., Saquaque, A., Juteau, T., Bohn, M.M., Samson, S., Kornprobst, M., 2002. Proterozoic blueschist-bearing mélange in the Anti-Atlas Mountains, Morocco. *Precambrian Research*, v. 118, p. 179–194.
- Hefferan, K., Soulaïmani, A., Samson, S.D., Admou, H., Inglis, J., Saquaque, A., Latifa, C., Heywood, N., 2014. A reconsideration of Pan African orogenic cycle in the Anti-Atlas Mountains, Morocco. *J. African Earth Sci.*, v. 98, p. 34–46. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2014.03.007>
- Hein, J.R., Koschinsky, A., Bau, M., Manheim, F.T., Kang, J.K., Roberts L., 2000. Cobalt rich ferromanganese crusts in the pacific, in: *Marine Mineral Deposits*. p. 239–279.
- Hein, J.R., Koschinsky, A., 2014. Deep-Ocean Ferromanganese Crusts and Nodules A2 - Holland, Heinrich D, in: Turekian, K.K. (Ed.), *Treatise on Geochemistry (Second Edition)*. Elsevier, Oxford, p. 273-291.
- Heinrich, C.A., Günther, D., Audétat, A., Ulrich, T. and Frischknecht, R., 1999. Metal fractionation between magmatic brine and vapor, determined by microanalysis of fluid inclusions. *Geology*, v. 27 (8), p. 755-758.
- Heinrich, C.A., Ryan, C.G., Mernagh, T.P. and Eadington, P.J., 1992. Segregation of ore metals between magmatic brine and vapor ; a fluid inclusion study using PIXE microanalysis. *Economic Geology*, v. 87 (6), p. 1566-1583.
- Herrmann, A.G., Knake, D., Schneider, J. and Peters, H., 1973. Geochemistry of modern seawater and brines from salt pans: main components and bromine distribution. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 33 (1), p. 1-24.
- Hesse R., 2003. Pore water anomalies of submarine gas-hydrate zones as tool to assess hydrate abundance and distribution in the subsurface – what we have learned in the past decade? *Earth Sci. Rev.*, v. 61, p. 149–179.

- Hezarkhani, A. & Williams-Jones, A.E., 1998. Controls of alteration and mineralization in the Sungun porphyry copper deposit, Iran ; evidence from fluid inclusions and stable isotopes. *Economic Geology*, v. 93 (5), p. 651-670.
- Hindermeyer, J., 1953a. Le Précambrien I et le Précambrien II du Saghro. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, v. 237, p 921-923.
- Hindermeyer, J., 1953b. Le Précambrien III du Saghro. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, v. 237, p 1024-1026.
- Hitzman, M.W., Broughton, D., Selley, D., Woodhead, J., Wood, D., Bull, S., 2012. The Central African Copperbelt: Diverse stratigraphic, structural, and temporal settings in the world's largest sedimentary copper district, in: Hedenquist, J.W., Harris, M., Camus, F. (Eds.), *Geology and Genesis of Major Copper Deposits and Districts of the World: A Tribute to Richard H. Sillitoe*. Society of Economic Geologists, Littleton, Co, v. 16, p. 487-514.
- Hölker, A., Manatchal, G., Holliger, K., Bernoulli, D., 2003, Tectonic nature and seismic response of top-basement detachment faults in magma-poor rifted margins. *Tectonics*, v. 22 (4), 1035, 15 p.
- IEOM, 2016. Nouvelle-Calédonie Rapport annuel 2016, IEOM, 182 p. ISSN 1635-2262
- Ikenne, M., Mortaji, A., Gasquet, D., Stussi, J.M., 1997. Les filons basiques des boutonnières du Bas Drâa et de la Tagragra d ' Akka : témoins des distensions noprothozoïques de l'Anti-Atlas occidental (Maroc). *Journal of African Earth Sciences*, v. 25, p. 209–223.
- Ildefonse, B., Blackman, D.K., John, B.E., Ohara, Y., Miller, D.J., MacLeod, C.J., 2007. Oceanic core complexes and crustal accretion at slow-spreading ridges. *Geology*, v. 35, p. 623-626.
- Inglis, J. D., Lemos, R. S. D., Samson, S. D., Admou, H., 2005, Geochronological Constraints on Late Precambrian Intrusion, Metamorphism and Tectonism in the Anti-Atlas Mountains: *The Journal of Geology*, v. 113, p. 439–450.
- Ishii, T., Robinson, P.T., Maekawa, H., Fiske, R., 1992. Petrological studies of peridotites from diapiric serpentinite seamounts in the Izu–Ogasawara–Mariana Forearc, Leg 125. In: Fryer, P., Pearce, J.A., Stokking, L.B., et al. (Eds.), *Proceeding of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, v. 125, p. 445–485
- Ivanov, A.A. & Voronova, M.L., 1972. *Evaporite Formation*. Nedra, Moscow, 328 p. (in Russian).
- Jouravsky G., 1952. Cobalt et nickel (IV), Argent (IX), Or (X) : Géologie des gîtes minéraux marocains: XIX. Congr. géol. intern. Monogr. rég., 3e série, Maroc, p. 87–101.

- Kamenetsky, V.S. et al., 2002. Extreme chemical heterogeneity of granite-derived hydrothermal fluids: An example from inclusions in a single crystal of miarolitic quartz. *Geology*, v. 30(5), p. 459-462.
- Karaoui, B., Breikreuz, C., Mahmoudi, A., Youbi, N., 2014. Physical volcanology, geochemistry and basin evolution of the Ediacaran volcano-sedimentary succession in the Bas Draâ inlier (Ouarzazate Supergroup, Western Anti-Atlas, Morocco). *Journal of African Earth Sciences*, v. 99, p. 307–331. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2014.06.022>
- Karvavin, V.K. & Voloshina, Z.M., 2001. Stability fields of minerals in Pechenga ultramafics (Kola Peninsula) as a function of fluid regime. *Proceedings of the Russian Mineralogical Society*, v. 130, p. 1-9 (in Russian)
- Kastner M., Kvenvolden K. A. and Lorenson T. D., 1988. Chemistry, isotopic composition, and origin of a methane–hydrogen sulfide hydrate at the Cascadia subduction zone. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 156, p. 173–183.
- Kelley D. S. & Früh-Green G. L., 1999. Abiogenic methane in deep-seated mid-ocean ridge environments: insights from stable isotope analyses. *J. Geophys. Res.*, v. 104, p. 10439–10460.
- Kendrick, M., 2012. High precision Cl, Br and I determination in mineral standards using the noble gas method. *Chemical Geology*, v 292-293, p. 116–126.
- Kerrich, R., Strong, D., Andrews, A., Owsiacki, L., 1986. The silver deposits at Cobalt and Gowganda, Ontario. III: hydrothermal regimes and source reservoirs-evidence from H, O, C, and Sr isotopes and fluid inclusions. *Can. J. Earth Sci.*, v. 23 (10), p. 1519–1550.
- Ketcham, R.A., Carter, A.C., Donelick, R.A., Barbarand, J., Hurford, A.J., 2007. Improved modeling of fission-track annealing in apatite. *Am. Min.*, v. 92, p. 799-810.
- Khaibullin, I.K. & Borisov, N.M., 1966. Experimental investigation of the thermal properties of aqueous and vapour solutions of sodium and potassium chlorides at phase equilibrium. (in Russian) *Teplofizika Vysokikh Temperatur*, v. 4 (4), p. 518-523.
- Kharaka, Y.K. and Hanor, J.S., 2003. Deep fluids in the continents: I. Sedimentary basins. *Treatise on geochemistry*, v. 5, p. 499-533.
- Kharaka, Y.K. et al., 1987. Geochemistry of metal-rich brines from central Mississippi Salt Dome basin, U.S.A. *Applied Geochemistry*, v. 2(5–6), p. 543-561.

Kharaka, Y.K., Lico, M.S., Wright, V.A. and Carothers, W.W., 1980. Geochemistry of formation waters from Pleasant Bayou No. 2 well and adjacent areas in coastal Texas. Fourth United St, 168 p.

Kissin, S.A. 1988. Nickel-cobalt-native silver (five-element) veins: a rift-related ore type, in Kisvarsanyi, G. and Grant. SK eds, proceedings volume, north American conference on tectonic control of ore deposits and the vertical and horizontal extent of ore systems: university of Missouri-rolla, rolla, Mo., p. 288-279.

Kissin, S.A., 1992. Five-element (Ni-Co-As-Ag-Bi) veins. *Geosciences Canada*, v. 19, p. 113–124.

Klemm, L.M., Pettke, T., Heinrich, C.A. and Campos, E., 2007. Hydrothermal Evolution of the El Teniente Deposit, Chile: Porphyry Cu-Mo Ore Deposition from Low-Salinity Magmatic Fluids. *Economic Geology*, v. 102(6), p. 1021-1045.

Kostov, R.I. & Bershov, L.V., 1987. Systematics of paramagnetic electron-hole centres in natural quartz (in Russ.). *Izvestiya Akademii nauk SSSR, Seria geologia*, v. 7, p. 80–87

Kouzmanov, K., Bailly, L., Ramboz, C., Rouer, O., Bény, J.M., 2002. Morphology, origin and infrared microthermometry of fluid inclusions in pyrite from the Radka epithermal copper deposit, Srednogie zone, Bulgaria. *Mineralium Deposita*, v. 37, p. 599-613.

Kravtsova, O.A., Maximov, V.I., and Sokolov, S.V., 2002, Distribution of plat- inum-group elements in Pechenga Cu-Ni sulfide ores and concentrates. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, v. 111, sec. C, p. 128–132.

Krutov G.A., 1970. Deposits of nickel-cobalt ores of the Bou-Azzer district (Morocco) : Geology of ore deposits. – Moscow: Nauka, v. 4, p. 27–40 (en Russe).

Kvenvolden K. A., 1993. Gas hydrates geological perspective and global change. *Rev. Geophys.*, v. 31, p. 173–187.

## L

Lagabrielle, Y., 2009. Mantle exhumation and lithospheric spreading: an historical perspective from investigations in the oceans and in the Alps-Apennines ophiolites. *Italian Journal of Geosciences*, v. 128, p. 279–293.

Lagabrielle, Y. & Auzende, J.M., 1982. Active in situ disaggregation of oceanic crust and mantle on Gorrige Bank: analogy with ophiolitic massives. *Nature*, v. 297, p. 490–493.

- Lagabrielle, Y., & Cannat, M., 1990. Alpine Jurassic ophiolites resemble the modern central Atlantic basement. *Geology*, v. 18 (4), p. 319–322.
- Lagabrielle, Y. & Bodinier, J.L., 2008. Submarine reworking of exhumed subcontinental mantle rocks: Field evidence from the Lherz peridotites, French Pyrenees. *Terra Nova*, v. 20, p. 11–21. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2007.00781.x>
- Land, L.S., Macpherson, G.L. and Mack, L.E., 1988. The geochemistry of saline formation waters, Miocene, offshore Louisiana. Gulf Coast, Association of Geological Societies, Transactions, v. 38, p. 503-511.
- Latham, A.J., and Riding, R., 1990, Fossil evidence for the location of the Precambrian-Cambrian boundary in Morocco: *Nature*, v. 344, p. 752–754.
- Laubier, M., Grove, T.L., Langmuir, C.H., 2014, Trace element mineral/melt partitioning for basaltic and basaltic andesitic melts: An experimental and laser ICP-MS study with application to the oxidation state of mantle source regions: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 392, p. 265-278.
- Laurent Jolivet, Armel Menant, Camille Clerc, Pietro Sternai, Nicolas Bellahsen, Sylvie Leroy, Raphaël Pik, Martin Stab, Claudio Faccenna, Christian Gorini., 2018 Extensional crustal tectonics and crust-mantle coupling, a view from the geological record *Earth-Science Reviews*, v. 185, p. 1187–1209.
- Leblanc, M., 1972, Sur le style disharmonique des plis hercyniens à la base de la couverture dans l'Anti-Atlas central : *Acad. Sci. Paris C.R.*, v. 275D, p. 803-806.
- Leblanc, M., 1975, Ophiolites précambriennes et gîtes arseniés de cobalt (Bou Azzer, Maroc): Unpublished M.Sc. thesis, University of Montpellier, 329 p.
- Leblanc, M., 1976, Proterozoic oceanic crust at Bou Azzer: *Nature*, v. 261, p. 34–35.
- Leblanc, M., Lancelot, J.R., 1980. Interprétation géodynamique du domaine pan-africain (Précambrien terminal) de l' Anti-Atlas (Maroc) à partir de données géologiques et géochronologiques. *Can. J. Earth Sci.*, v. 17, p. 142–155.
- Leblanc, M., 1981. Chapter 17 The Late Proterozoic Ophiolites of Bou Azzer (Morocco): Evidence for Pan-African Plate Tectonics. *Developments in Precambrian Geology*, v. 4, p. 435–451. [https://doi.org/10.1016/S0166-2635\(08\)70022-7](https://doi.org/10.1016/S0166-2635(08)70022-7)
- Leblanc, M., 1986, Co-Ni arsenide deposits, with accessory gold, in ultramafic rocks from Morocco: *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 23, p. 1592–1602.



- Leblanc, M., & Billaud, P., 1982, Cobalt arsenide orebodies related to an upper Proterozoic ophiolite: Bou Azzer (Morocco): *Econ. Geol.*, v. 77, p. 162-175.
- Leblanc, M., and Fischer, W., 1990, Gold and platinum group elements in cobalt arsenide ores: Hydrothermal concentration from a serpentinite source-rock: *Mineralogy and Petrology*, v. 42, p. 197–209.
- Leblanc, M., & Lbouabi, M., 1988, Native Silver Mineralisation along a Rodingite Tectonic Contact between Serpentinite and Quartz Diorite (Bou Azzer, Morocco): *Economic Geology*, v. 83, p. 1379–1391.
- Leblanc, M., Lancelot, J.R., 1980. Interprétation géodynamique du domaine pan-africain ( Précambrien terminal ) de l' Anti-Atlas ( Maroc ) à partir de données géologiques et géochronologiques. *Can J Earth Sci*, v. 17, p. 142–155.
- Leblanc, M., Lancelot, J.R., 1980. Interprétation géodynamique du domaine pan-africain ( Précambrien terminal ) de l' Anti-Atlas ( Maroc ) à partir de données géologiques et géochronologiques. *Can. J. Earth Sci.*, v. 17, p. 142–155.
- Leblanc, M., Moussine-Pouchkine, A., 1994. Sedimentary and volcanic evolution of a Neoproterozoic continental. *Precambrian Research*, v. 70, p. 25–44.
- Lemoine, M., 1980. Serpentinites, gabbros and ophicalcites in the Piemont-Ligurian domain of the Western Alps: possible indicators of oceanic fracture zone and of associated serpentinite protrusions in the Jurassic-Cretaceous Thetys. *Archives des Sciences Genève*, v. 33, p.103–115.
- Levresse, G., 2001, Contribution à l'établissement d'un modèle génétique des gisements d'Imiter (Ag-Hg), Bou Madine (Pb-Zn-Cu-Ag-Au) et Bou Azzer (Co-Ni-As-Ag-Au) dans l'Anti-Atlas marocain: Unpublished M.Sc. thesis, CRPG-CNRS, Nancy, France, 277 p.
- Lhoest, J.J., 1995, The Kipushi mine, Zaire: *Mineralogical Record*, v. 26, p. 163–192.
- Li, W., Audétat, A., Zhang, J., 2015. The role of evaporites in the formation of magnetite-apatite deposits along the Middle and Lower Yangtze River, China: Evidence from LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions. *Ore Geology Reviews*, v. 67, p. 264–278. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.12.003>
- Liégeois, J.P., Claessens, W., Camara, D., Klerkx, J., 1991. Short-lived Eburnian orogeny in southern Mali. *Geology, tectonics, U–Pb and Rb–Sr geochronology*. *Precambrian Res.* v. 50, p. 111– 136.

Ludwig, K.R. (2012) User's Manual for Isoplot 3.75. A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronological Center, 75 p.

## M-N

Maacha, L., Alansari, A., Saquaque, A., Soulaïmani, A., 2012. The Bou Azzer Cobalt-Nickel-Arsenic District, in: *Les Mines de l'Anti-Atlas Central*. pp. 91–97.

Maacha, L., Elghorfi, M., Ennaciri, A., Sadiqqi, O., Soulaïmani, A., Alansari, A., Bhilisse, M., 2015, Nouvelles données isotopiques et d'inclusions fluides des minéralisations cobaltifères de Bou Azzer. Apport à la géologie économique de la boutonnière. (Anti-Atlas central, Maroc) : In *Notes et Mémoires du service Géologique*, v. 579, p. 133-139.

Maacha, L., Lebedev, V.I., Zouhair, M., Maamar, B., Saddiqi, O., Soulaïmani, A., 2015. Apport de l'étude des inclusions fluide dans la compréhension de la genèse du gisement argentifère d'Imiter. (Anti-Atlas oriental, Maroc). *Notes et mémoires du service géologique*, v. 579, p. 141–145.

Machel, H.G. & Burton, E.A., 1991. Factors governing cathodoluminescence in calcite and dolomite, and their implications for studies of carbonate diagenesis. In *Luminescence Microscopy and Spectroscopy: Qualitative and Quantitative Applications*, Barker, C.E. & Kopp, O.C. (Eds.), p. 37–58. Tulsa, OK: SEPM

Manatschal, G., 2004. New models for evolution of magma-poor rifted margins based on a review of data and concepts from West Iberia and the Alps. *International Journal of Earth Sciences*, v. 93, p. 432–466.

Manatschal, G., Engström, A., Desmurs, L., Schaltegger, U., Cosca, M., Müntener, O., Bernoulli, D., 2006. What is the tectono-metamorphic evolution of continental break-up: The example of the Tasna Ocean–Continent Transition. *J. Struct. Geol.*, v. 28, p. 1849-1869.

Manheim, F. T. and Lane-Bostwick, C. M., 1988. Cobalt in ferromanganese crusts as a monitor of hydro- thermal discharge on the Pacific seafloor, *Nature*, v. 335, 59 p.

Manheim, F.T., Lane-Bostwick, C.M., 1988. Cobalt in ferromanganese crusts as a monitor of hydrothermal discharge on the Pacific sea floor. *Nature* 335, 59-62.

Marakushev, A.A., Paneyakh, N.A., and Zotov, I.A., 2002, Specific features of the formation of copper-nickel sulfide deposits in trap rocks: Evidence from Pechenga and Noril'sk regions: *Doklady. Earth Sciences*, v. 383, p. 129–133.

- Marcoux, É., Wadajiny, A., 2005. Le gisement Ag-Hg de Zgounder (Jebel Siroua, Anti-Atlas, Maroc): Un épithermal néoprotérozoïque de type Imiter. *Comptes Rendus – Geoscience*, v. 337, p. 1439–1446. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2005.09.005>
- Marfunin, A.S., 1979. *Spectroscopy, Luminescence and Radiation Centres in Minerals*. Berlin, Germany: Springer, 356 p.
- Mark G. Doylea, Rodney L. Allen, 2003. Subsea-floor replacement in volcanic-hosted massive sulfide deposits *Ore Geology Reviews*, v. 23, p. 183–222.
- Markl, G., Burisch, M., Neumann, U., 2016, Natural fracking and the genesis of five-element veins. *Mineralium Deposita*, v. 51, p. 703–712.
- Markl, G., Marks, M.A.W., Derrey, I., Gühring, J., 2014. Weathering of cobalt arsenides : Natural assemblages and calculated stability relations among secondary Ca-Mg-Co arsenates and carbonates. *American Mineralogist*, v. 99, p. 44–56.
- Marroni, M., Molli, G., Ottria, G., Pandolfi, L., 2001. Tectono-sedimentary evolution of the External Liguride Units (Northern Apennine, Italy): from rifting to convergence history of a fossil ocean-continent transition zone. *Geodinamica Acta*, v. 14, p. 307–320
- Marshall, D.J., 1988. *Cathodoluminescence of Geological Materials*. Boston, MA: Unwin-Hyman, 146 p.
- Marshall Diamond, L. W., Skippen, G. B., D.D., 1993. Silver transport and deposition ayt Cobalt, Ontario, Canda: Fluid inclusion evidence. *Economic Geology*, v. 88–4, p. 837–854. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.88.4.837>
- Mason, R.A. & Mariano, A.N., 1990. Cathodoluminescence activation in manganese bearing and rare-earth bearing synthetic calcites. *Chem Geol.*, v. 88, p. 191–206.
- McCaffrey, M.A., Lazar, B. and Holland, H.D., 1987. The evaporation path of seawater and the coprecipitation of Br (super -) and K (super +) with halite. *Journal of Sedimentary Research*, v. 57(5), p. 928-937.
- McDowell, F.W., McIntosh, W.C., and Farley, K.A., 2005. A precise  $^{40}\text{Ar}$ – $^{39}\text{Ar}$  reference age for the Durango apatite (U–Th)/He and fission-track dating standard. *Chemical Geology*, v. 214, p. 249–263.
- Mével, C. 2003 Serpentinization of abyssal peridotites at mid-ocean ridges. *C. R. Geoscience*, v. 335, p. 825-852.

- Michard, A., and Albarède, F., 1985, The REE content of some hydrothermal fluids, *Chemical Geology*, v. 55, p. 51-60.
- Mifdal, A., and Peucat, J.J., 1985, U-Pb and Rb-Sr dating of acidic volcanic rocks and Precambrian basement in Anti-Atlas of Morocco (Ouarzazate). Contribution for numerical dating of Precambrian-Cambrian boundary, In: *Sciences Géologiques. Bulletin*, v. 38, p. 185–200.
- Misra K.C . 2000. Sediment-Hosted Massive Zinc-Lead Sulfide (SMS) Deposits. In: *Understanding Mineral Deposits*. Springer, Dordrecht, p. 450-495.
- Missenard, Y., Zeyen, H., Frizon de Lamotte, D., Leturmy, P., Petit, C., Sébrier, M., Saddiqi, O., 2006. Crustal versus asthenospheric origin of relief of the Atlas Mountains of Morocco. *J. Geophys. Res.-Solid Earth*, v. 111, 3401 p.
- Moncada, D. & Bodnar, R. J., 2012. Gangue mineral textures and fluid inclusion characteristics of the santa margarita vein in the guanajuato mining district, Mexico. *Central European Journal of Geosciences*, v. 4(2), p. 300–309. <https://doi.org/10.2478/s13533-011-0057-8>
- Morse, J.W. and Bender, M.L., 1990. Partition coefficients in calcite: An examination of factors influencing the validity of experimental results and their application to natural systems: *Chem. Geol.*, v. 82, p. 265-277.
- Mortaji, A., Ikenne, M., Gasquet, D., Barbey, P., Stussi, J.M., 2000. Les granitoïdes paléoprotérozoïques des boutonnières du Bass Drâa et de la Tagragra d’Akka (Anti-atlas occidental, Maroc): Un élément du puzzle géodynamique du craton ouest-africain. *Journal of African Earth Sciences*, v. 31, p. 523–538. [https://doi.org/10.1016/S0899-5362\(00\)80005-6](https://doi.org/10.1016/S0899-5362(00)80005-6)
- Mrini, Z., 1993. Chronologie (Rb–Sr, U–Pb) et trac, age isotopique (Sr–Nd–Pb) des sources de roches magmatiques éburnéennes, panafricaines et hercyniennes du Maroc. Thèse, Université de Marrakech, 276 p.
- Nadler, A. and Magaritz, M., 1980. Studies of marine solution basins— isotopic and compositional changes during evaporation. In: A. Nissenbaum (ed.), *Hypersaline Brines and Evaporitic Environments*. Developments in Sedimentology. Elsevier, Amsterdam, 115-130 p.
- Naidoo, D.D., Bloomer, S.H., Saquaque, A., Hefferan, K., 1991b. Geochemistry and significance of metavolcanic rocks from the Bou Azzer-El Graara ophiolite (Morocco). *Precambrian Research* v. 53, p. 79–97. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(91\)90006-V](https://doi.org/10.1016/0301-9268(91)90006-V)
- Naldrett, A.J., 2005. A history of our understanding of magmatic Ni-Cu sulfide deposits. *Canadian Mineralogist*, v. 43, p. 2069–2098. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.43.6.2069>

Norr, P.D. Jr, Newson, H.E., Leeman, W.P., Ryan, J.G., (1996. The role of hydrothermal fluids in the production of subduction zone magmas: evidence from siderophile and chalcophile trace elements and boron. *Geochim Cosmochim Acta*. v. 60, p. 587–611

## O-P

Oberthur, T., Melcher, F., Henjes-Kunst, F., Gerdes, A., Stein, H., Zimmerman, A., El Ghorfi, M., 2009. Hercynian age of the Cobalt-Nickel-Arsenide-(Gold) ores, Bou Azzer, Anti-Atlas, Morocco, Re-Os, Sm-Nd, and U-Pb age determinations. *Economic Geology* 104, 1065–1079.

Ohmoto, H., and Skinner, B.J., 1983, The Kuroko and related volcanogenic massive sulfide deposits: *Economic Geology Monograph*, v. 5, 604 p.

Ohnenstetter, M., 1979. La série ophiolitifère de Rospigliano (Corse) est-elle un témoin des phénomènes tectoniques, sédimentaires et magmatiques liés au fonctionnement des zones transformantes? *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, D*, v. 289, p. 1199–1202.

Ondrus, P., Veselovsky, F., Gabasova, A., Hlousek, J., Srein, V., 2003. Geology and hydrothermal vein system of the Jáchymov ( Joachimsthal ) ore district. *journal of the czech geological survey*, v. 4, p. 3–18.

Orloff, O., 1968, Etude géologique et géomorphologique des massifs d'ultrabasites compris entre Houailou et Canala (Nouvelle-Calédonie): Unpublished M.Sc. thesis, Université de Montpellier, France, 189 p.

Ouanaimi, H. & Soulaïmani, A., 2011. Circuit C5, Anti-Atlas central. In: *Nouveaux guides géologiques et miniers du Maroc*. Vol. 3, (A. Michard, H. Ouanaimi and A. Soulaïmani, eds). *Notes Mém. Serv. Géol. Maroc*, v. 558, p. 73–122.

Ouguir, H., Macaudière, J., Dagallier, G., 1996. Le Protéozoïque supérieur d'Imiter, Saghro oriental, Maroc: un contexte géodynamique d'arrière-arc. *Journal of African Earth Sciences*, v. 22, p. 173–189.

Ouguir, H., Macaudière, J., Dagallier, G., Qadrouci, A., Leistel, J. M., 1994, Cadre structural du gîte Ag-Hg d'Imiter (Anti Atlas, Maroc): implication métallogénique. *Bulletin de La Société Géologique de France*, v. 165, p. 233–248.

Paquette, J., and Reeder, R. J., 1995, Relationship between surface structure, growth mechanism, and trace element incorporation in calcite: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 59, p. 735–749.

- Paquez, C., 2017. Caractérisation structurale et géochimique des serpentinites de Bou Azzer, Anti-Atlas, Maroc. Implications géodynamiques. Manuscrit de Master 2. Université de Montpellier, 47 p.
- Pasava, J., 1994. Geochemistry and the role of anoxic sediments in the origin of the Imiter silver deposit in. Czech Geological Survey, v. 69, p. 11.
- Pearce, N.J.G., Perkins, W.T., Westgate, J.A., Gorton, M.P., Jackson, S.E., Nael, C.R., and Chenery, S.P., 1997, Compilation of new and published major trace element data for NIST SRM 610 and NIST SRM 612 glass reference materials: Geostandards Newsletter, v. 21, p. 115–144.
- Pedersen, R.B., Dunning, G.R., Robins, B., 1989. U–Pb ages of nepheline syenite pegmatites from the Seiland Magmatic Province, N Norway. In: Gayer RA (ed) The Caledonide geology of Scandinavia. Graham & Trotman, London, p. 3–8.
- Peron-Pinvidic, G. & Manatschal, G., 2008. The final evolution at deep magma-poor passive margins from Iberia-Newfoundland: a new point of view. International Journal of Earth Sciences, v. 98, p. 1581-1597. doi:10.1007/s00531-008-0337-9.
- Picazo, S., Cannat, M., Delacour, A., Escartin, J., Rouméjon, S., Silantyev, S., 2012. Deformation associated with the denudation of mantle- derived rocks at the Mid-Atlantic Ridge 13°–15°N: the role of magmatic injections and hydrothermal alteration. *Geochem Geophys Geosyst.*, v. 175–176, p. 255–271. doi:10.1029/2012GC004121
- Pirrie, D., Butcher, A.R., Power, M.R., Gottlieb, P., Miller, G.L., 2004, Rapid quantitative mineral and phase analysis using automated scanning electron microscopy (QEMSCAN); potential applications in forensic geoscience, In: Geological Society, London, Special Publication, v. 232, p. 123-136.
- Pouit, G., 1966, Paléogéographie et répartition des minéralisations stratiformes de cuivre dans l’anti-Atlas occidental (Maroc): *Chron Rech Min*, v. 356, p. 279-289.

## **R-S**

- Reynard, B., Lécuyer, C., Grandjean, P., 1999. Crystal-chemical controls on rare-earth element concentrations in fossil biogenic apatites and implications for paleoenvironmental reconstructions. *Chemical Geology*, v.155 (3-4), p. 233-241
- Righter, K., Leeman, W. P., Hervig, R. L., 2006, Partitioning of Ni, Co and V between spinel-structured oxides and silicate melts: Importance of spinel composition: *Chemical Geology*, v. 227, p. 1–25.

- Roberts, N. M. W., Troy Rasbury, E., Parrish, R. R., Smith, C. J., Horstwood, M. S. A., Condon, D. J., 2017. A calcite reference material for LA-ICP-MS U-Pb geochronology. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, v. 18, p. 2807–2814. doi:10.1002/2016GC006784
- Routhier, P., Leblanc, M., Clavel, M., 1970. Les gisements de cobalt de Bou Azzer (Maroc) sont portés par un niveau sédimentaire précambrien: *Acad. Sci. [Paris] Comptes Rendus*, v. 270D, p. 1857-1860.
- Rusk, B.G., Reed, M.H., Dilles, J.H., Klemm, L.M. and Heinrich, C.A., 2004. Compositions of magmatic hydrothermal fluids determined by LA-ICP-MS of fluid inclusions from the porphyry copper–molybdenum deposit at Butte, MT. *Chemical Geology*, v. 210(1–4), p. 173-199.
- Samson, S.D., Inglis, J.D., D’Lemos, R.S., Admou, H., Blichert-Toft, J., Hefferan, K., 2004. Geochronological, geochemical, and Nd-Hf isotopic constraints on the origin of Neoproterozoic plagiogranites in the Tasriwine ophiolite, Anti-Atlas orogen, Morocco. *Precambrian Research*, v. 135, p. 133–147. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2004.08.003>
- Sander, M.V., Black, J.E., 1988. Crystallization and recrystallization of growth-zoned vein quartz crystals from epithermal systems; implications for fluid inclusion studies, *Economic Geology*, v. 83 (5), p. 1052–1060.
- Sanford, R.F., 1981. Mineralogical and chemical effects of hydration reactions and applications to serpentinization. *Amer Miner*, v. 66, p. 290–297
- Saquaque, A., Admou, H., Karson, J., Hefferan, K., Reuber, I., 1989. Precambrian accretionary tectonics in the Bou azzer-El Graara region, Anti-Atlas, Morocco. *Geology*, v. 17, p. 1107–1110.
- Scamberulli, M., Piccardo, G.B., Pjilippot, P., Robbiano, A., Negretti, L., 1997. High salinity fluid inclusions formed from recycled seawater in deeply subducted alpine serpentinite *Earth and Planetary Science Letters*, v. 148, p. 485-499
- Schiavo, A., Taj-Eddine, K., Algouti, Ah., Benvenuti, M., Dal Piaz, G.V., Eddebbi, A., El Boukhari, A., Laftouhi, N., Massironi, M., Moratti, G., Ouanaimi, H., Pasquarè, G., Visonà, D., 2007. Carte Géologique du Maroc au 1/50 000, feuille Imtir. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, v. 518, 96 p.
- Schoene, B., & Bowring, S.A., 2006. U–Pb systematics of the McClure Mountain syenite: Thermochronological constraints on the age of the  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  standard MMhb. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 151, p. 615–630.

- Seo, J.H., Guillong, M. and Heinrich, C.A., 2009. The role of sulfur in the formation of magmatic–hydrothermal copper–gold deposits. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 282(1–4), p. 323–328.
- Seo, J.H., Guillong, M. and Heinrich, C.A., 2012. Separation of Molybdenum and Copper in Porphyry Deposits: The Roles of Sulfur, Redox, and pH in Ore Mineral Deposition at Bingham Canyon. *Economic Geology*, v. 107(2), p. 333–356.
- Seo, J.H., Guillong, M., Aerts, M., Zajacz, Z. and Heinrich, C.A., 2011. Microanalysis of S, Cl, and Br in fluid inclusions by LA–ICP–MS. *Chemical Geology*, v. 284(1–2), p. 35–44.
- Seward, T. M., 1976. The stability of chloride complexes of silver in hydrothermal solutions up to 350°C: *Geochim. et Cosmochim. Acta*, v. 40, p. 1329–1341.
- Seward, T.M., Williams-Jones, A.E., Migdisov, A.A., 2014. The Chemistry of Metal Transport and Deposition by Ore-Forming Hydrothermal Fluids. In *Treatise on Geochemistry*, 2nd ed.; Holland, H.D., Turekian, K.K., Eds.; Elsevier: Oxford, UK, v. 13, pp. 29–57. ISBN 978-0-08-098300-4.
- Sinha, S.P., 1983. "The Europium anomaly". Systematics and the properties of the lanthanides, Scientific Affairs Division, North Atlantic Treaty Organization, p. 550–553. ISBN 978-90-277-1613-2.
- Sizaret, S., Branquet, Y., Gloaguen, E., Chauvet, A., Barbanson, L., Chen, Y., 2009. Estimating the local paleo-fluid flow velocity: New textural method and application to metasomatism Earth and Planetary Science Letters, v. 280, p. 71–82
- Skelton A.D.L. and J.W. Valley, 2000. The relative timing of serpentinisation and mantle exhumation at the ocean-continent transition, Iberia: constraints from oxygen isotopes, *Earth and Planetary Science Letters*, v. 178, p. 327–338
- Sleep N. H., Meibom A., Fridriksson T., Coleman R. G. and Bird D. K., 2004. H<sub>2</sub>-rich fluids from serpentinization: geochemical and biotic implications. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, v. 101, p. 12818–12823.
- Smedley, P. L., and Kinniburgh, D. G., 2002, A review of the source, behaviour and distribution of arsenic: *Natural waters*, v. 17, p. 517–568.
- Smith, C.G., 2001. Always the bridesmaid, never the bride: Cobalt geology and resources. *Applied Earth Science: Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, v. 110, sec. B, p. 75–80.



Smith, K. S. (1999). Metal Sorption on Mineral Surfaces: An Overview with Examples Relating to Mineral Deposits: Review in *Economic Geology*, v. 6A–6B, p. 161–182.

Smith, M.P., Gleeson, S.A. and Yardley, B.W.D., 2013. Hydrothermal fluid evolution and metal transport in the Kiruna District, Sweden: Contrasting metal behaviour in aqueous and aqueous–carbonic brines. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 102(0), p. 89-112.

Smolsky, I.L., Voloshin, A., Zaitseva, N., Rudneva, E., Klapper, H., 1999. X-ray topographic study of striation formation in layer growth of crystals from solutions: *Philosophical Transactions of The Royal Society B Biological Sciences*, v. 357, p. 2631–2649.

Solomon, M. & Walshe, J.L., 1979. The formation of massive sulphide deposits on the sea floors. *Economic Geology*, v. 74, p. 797-813.

Song, S., Su, L., Niu, Y., Lai, Y., Zhang, L., 2009, CH<sub>4</sub> inclusions in orogenic harzburgite: Evidence for reduced slab fluids and implication for redox melting in mantle wedge, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v.73, p. 1737–1754

Soulaimani, A., Burkhard, M., 2006. The Anti-Atlas chain (Morocco): the southern margin of the Variscan belt along the edge of the West African craton. *The Boundaries of the West African Craton*, Geological Society, London, Special Publications, v. 297, p. 433–452. <https://doi.org/10.1144/SP297.20>

Spooner, E.T.C., Fyfe, W.S., 1973. Sub-sea-floor metamorphism, heat and mass transfer. *Contrib Miner Petrol*, v. 42 (4), p. 287–304. doi: 10.1007/BF00372607

Steele-MacInnis, M., Bodnar, R. J., & Naden, J. (2011). Numerical model to determine the composition of H<sub>2</sub>O-NaCl-CaCl<sub>2</sub> fluid inclusions based on microthermometric and microanalytical data. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 75(1), p. 21–40. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.10.002>

Stewart, F.H., 1963. Marine evaporites. In: M. Fleischer (M. Fleischer) (M. Fleischers)], \*Data of Geochemistry. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper, 433-Y, 52 p.

Sweeney, M.A., Blinda, P.L. and Vaughan, D.J. (1991) Genesis of the ores of the Zambian Copperbelt. *Ore Geology Reviews*, v. 6, p. 51-76.

## T-U-V

- Thomas, R.J., Chevallier, L.P., Gresse, P.G., Harmer, R.E., Eglington, B.M., Armstrong, R.A., De Beer, C.H., Martini, J.E.J., De Kock, G.S., Macey, P.H., Ingram, B.A., 2002. Precambrian evolution of the Sirwa Window, Anti-Atlas Orogen, Morocco. *Precambrian Research*, v. 118, p. 1–57. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(02\)00075-X](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(02)00075-X)
- Thomas, R.J., Fekkak, A., Ennih, N., Errami, E., Loughlin, S.C., Gresse, P.G., Chevallier, L.P., Liégeois, J.P., 2004. A new lithostratigraphic framework for the Anti-Atlas Orogen, Morocco: *Journal of African Earth Sciences*. *Journal of African Earth Sciences*, v. 39, p. 217-226.
- Thorpe R S 1972 Ocean floor basalt affinity of precambrian glaucophane schist from Anglesey *Nature Physical Science*, v. 240, No. 103, p.164-166.
- Tornos F., 2000 Environment of formation and styles of volcanogenic massive sulfides: The Iberian Pyrite Belt. *Ore Geology Reviews*, v. 28, p. 259–307
- Triantafyllou, A., 2016. Évolution géodynamique d'un arc insulaire néoproterozoïque de l'Anti -Atlas marocain : Caractérisation des processus de croissance intra-océanique et d'accrétion. Unpublished M.Sc. thesis,, Université de Mons, 406 p.
- Triantafyllou, A., Berger, J., Baele, J., Diot, H., Ennih, N., Plissart, G., Monnier, C., Watlet, A., Bruguier, O., Spagna, P., Vandycke, S., 2016. The Tachakoucht – Iriri – Tourtit arc complex ( Moroccan Anti-Atlas ): Neoproterozoic records of polyphased subduction-accretion dynamics during the Pan-African orogeny. *Journal of Geodynamics*, v. 96, p. 81–103. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2015.07.004>
- Triantafyllou, A., Berger, J., Baele, J.M., Bruguier, O., Diot, H., Ennih, N., Monnier, C., Plissart, G., Vandycke, S., Watlet, A., 2018. Intra-oceanic arc growth driven by magmatic and tectonic processes recorded in the Neoproterozoic Bougmane arc complex (Anti-Atlas, Morocco). *Precambrian Research*, v. 304, p. 39–63. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.10.022>
- Tucker, M. E., 1986, Carbon isotope excursions on Precambrian/Cambrian boundary beds, Morocco: *Nature*, v. 319, p. 48-50.
- Tuduri, J., 2005, Processus de formation et relations spatio-temporelles des minéralisations à or et argent en contexte volcanique Précambrien (Jbel Saghro, Anti-Atlas, Maroc) : Unpublished M.Sc. thesis, CNRS, Orleans, France, University of Orleans, 428 p.
- Tuduri, J., Chauvet, A., Barbanson, L., Bourdier, J.-L., Labriki, M., Ennaciri, A., Badra, L., Dubois, M., Ennaciri-Leloix, C., Sizaret, S., Maacha, L., 2018a. The Jbel Saghro Au(–Ag, Cu) and Ag–Hg Metallogenic Province: Product of a Long-Lived Ediacaran Tectono-Magmatic Evolution in the Moroccan Anti-Atlas. *Minerals*, v. 8, p. 592. <https://doi.org/10.3390/min8120592>

- Tuduri, J., Chauvet, A., Barbanson, L., Labriki, M., Dubois, M., Trapy, P.-H., Lahfid, A., Poujol, M., Melleton, J., Badra, L., Ennaciri, A., Maacha, L., 2018b. Structural control, magmatic-hydrothermal evolution and formation of hornfels-hosted, intrusion-related gold deposits: Insight from the Thaghassa deposit in Eastern Anti-Atlas, Morocco. *Ore Geol. Rev.*, v. 97, p. 171-198.
- Ulrich, T., Günther, D. and Heinrich, C.A., 2001. The Evolution of a Porphyry Cu-Au Deposit, Based on LA-ICP-MS Analysis of Fluid Inclusions: Bajo de la Alumbrera, Argentina. *Economic Geology*, v. 96(8), p. 1743-1774.
- Valyashko, M.G., 1956. Geochemistry of bromine in the processes of salt deposition and the use of the bromine content as a genetic and prospecting criterion. *Geochemistry*, 6: 570-589.
- Van Den Kerkhof, A.M., Hein, U.F., 2001. Fluid inclusion petrography. *Lithos*, v. 55, p. 27–47. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00037-2](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00037-2)
- Vanko, D.A., Griffith, J.D., Erickson, C.L., 1992. Calcium-rich brines and other hydrothermal fluids in fluid inclusions from plutonic rocks, Oceanographer Transform, Mid-Atlantic Ridge. *Geochim Cosmochim Acta*, v. 56(1), p. 35–47
- Vermeesch, P., 2018, IsoplotR: a free and open toolbox for geochronology. *Geoscience Frontiers*, v.9, p.1479-1493, doi: 10.1016/j.gsf.2018.04.001
- Villeneuve, M. & Cornée, J.J., 1994. Structure, evolution and palaeogeography of the West African craton and bordering belts during the Neoproterozoic. *Precambrian Res.*, v. 69, p. 307–326.

## W

- Wafik, A., Admou, H., Saquaque, A., El Boukhari, A., Juteau, T., 2001, Cu-Fe sulfureous mineralisations and the associated alterations in the Bou Azzer and Khzama Proterozoic ophiolites, Anti-Atlas, Morocco: *Ofioliti*, v. 26, p. 47–62.
- Walsh, G.J., Benziane, F., Aleinikoff, J.N., Harrison, R.W., Yazidi, A., Burton, W.C., Quick, J.E., Saadane, A., 2012. Neoproterozoic tectonic evolution of the Jebel Saghro and Bou Azzer-El Graara inliers, eastern and central Anti-Atlas, Morocco. *Precambrian Research*, v. 216, p. 23-62. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.06.010>
- Warren, J., 1999. *Evaporites*, Blackwell Science, Oxford, 438 p.
- Weil, J.A., 1984. A review of electron spin spectroscopy and its application to the study of paramagnetic defects in crystalline quartz. *Phys Chem Miner.*, v. 10, p. 149–165.

Weil, J.A., 1993. A review of the EPR spectroscopy of the point defects in  $\alpha$ -quartz: The decade 1982–1992. In *Physics and Chemistry of SiO<sub>2</sub> and the Si-SiO Interface 2*, Helms, C.R. & Deal, B.E. New York: Plenum Press. (Eds.), 131–144 p.

Wendt, I. & Carl, C., 1991. The statistical distribution of the mean squared weighted deviation. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, v. 86, p. 275-285

Whitmarsh, R.B., Manatschal, G., Minshull, T. a, 2001. Evolution of magma-poor continental margins from rifting to seafloor spreading. *Nature*, v. 413, p. 150–154. <https://doi.org/10.1038/35093085>

Whitmarsh, R.B., 2001. The role of syn-rift magmatism in the rift-to-drift evolution of the West Iberia continental margin: geophysical observations. *Geological Society, London, Special Publications*(2001),187(1):107

## **Y-Z**

Youbi, N., Kouyaté, D., Söderlund, U., Ernst, R.E., Soulimani, A., Hafid, A., Ikenne, M., El Bahat, A., Bertrand, H., Rkha Chaham, K., Ben Abbou, M., Mortaji, A., El Ghorfi, M., Zouhair, M., El Janati, M.h., 2013. The 1750Ma Magmatic Event of the West African Craton (Anti-Atlas, Morocco). *Precambrian Res.*, v. 236, p. 106-123.

Zherebtsova, I.K. and Volkova, N.N., 1966. Experimental study of behavior of trace elements in the process of natural solar evaporation of Black Sea water and Sasyk-Sivash brine. *Geochemistry International*, v. 3, p. 656-670.



## Annexe Chapitre II

Annexe II.1: tableau des lames minces faites sur les échantillons des différents sites miniers

<b>ECHANTILLON</b>	<b>LOCALITE</b>	<b>NIVEAU</b>	<b>ENCAISSANT</b>	<b>STRUCTURE</b>
BAE1	BAE - P6	-510	Diorite quartzite	veine sulf
BAE2	BAE - P6	-510	Diorite quartzite	Veine
BAE3	BAE - P6	-510	Diorite quartzite	Veine
BAE4	BAE - P6	-510	Diorite quartzite	Veine
BAE5a	BAE - P6	-510	Diorite quartzite	Veine
BAE5b	BAE - P6	-510	Diorite quartzite	Veine
BAE6	BAE - P6	-510	Diorite quartzite	Veine
BAE7a	BAE - P6	-510	Diorite quartzite	Veine
BAE7b	BAE - P6	-510	Diorite quartzite	Veine
BAE8	BAE - P6	-510	Diorite quartzite	Veine
BAE9	BAE - P6	-510	Diorite quartzite	Veine
BAE10	BAE - P6	-510	Diorite quartzite	Diorite quartzite
BAE11	BAE - P6	-510	Diorite quartzite	Veine
BAE12	Taghouni	-80	Diorite quartzite	veine quartz
BAE13	Taghouni	-80	Diorite quartzite	relais Veine
BAE14a	Taghouni	-80	Diorite quartzite	Veine
BAE14b	Taghouni	-80	Diorite quartzite	Veine
BAE14c	Taghouni	-80	Diorite quartzite	Veine
BAE14d	Taghouni	-80	Diorite quartzite	Veine
BAE14e	Taghouni	-80	Diorite quartzite	Veine
BA14	Taghouni-ouest	Surface	Serpentine	Serpentine
BAE15	Taghouni	-80	Diorite quartzite	Veine
BAE16a	Aghbar	-365	Grp. Ouarzazate	Min. massives
BAE16b	Aghbar	-365	Grp. Ouarzazate	Min. massives
BAE17	Aghbar	-365	Grp. Ouarzazate	Veine
BAE18	Aghbar	-365	Grp. Ouarzazate	Veine
BAE19	Aghbar	-365	Grp. Ouarzazate	Rhyolite
BAE20a1	Bouismass - P2	-390	Diorite quartzite	Veine
BAE20a2	Bouismass - P2	-390	Diorite quartzite	Veine
BAE21a	Bouismass - P2	-390	Diorite quartzite	Min. massives
BAE21b	Bouismass - P2	-390	Diorite quartzite	Min. massives
BAE22a	Bouismass - P1	-80	Diorite quartzite	Veine
BAE22b	Bouismass - P1	-80	Diorite quartzite	Veine
BAE22c	Bouismass - P1	-80	Diorite quartzite	Veine
BAE23	Bouismass - P1	-80	Diorite quartzite	Veine
BAE24a	Bouismass - P1	-80	Diorite quartzite	Veine
BAE25	Bouismass - P1	-80	gneiss ?	gneiss?
BAE26	Taghouni	-80	Diorite quartzite	Veine
BAE27a	Aghbar	-325	Grp. Ouarzazate	Min. massives
BAE27b	Aghbar	-325	Grp. Ouarzazate	Min. massives
BAE28a	Taghouni	-80	Diorite quartzite	Veine

BAE28c	Taghouni	-80	Diorite quartzite	Veine
BAE28e	Taghouni	-80	Diorite quartzite	Veine
BAE29	Surface	surface	Diorite quartzite	birbirite
BAE30a	BAE - P3	-302	Diorite quartzite	Veine
BAE30b	BAE - P3	-302	Diorite quartzite	Veine
BAE31a	BAE - P3	-302	Diorite quartzite	Veine
BAE31b	BAE - P3	-302	Diorite quartzite	Veine
BAE31c	BAE - P3	-302	Diorite quartzite	Veine
BAE32a	Oumlil	-77	Grp. Ouarzazate	Veine
BAE32b1	Oumlil	-77	Grp. Ouarzazate	Veine
BAE32b2	Oumlil	-77	Grp. Ouarzazate	Veine
BAE32b3	Oumlil	-77	Grp. Ouarzazate	Veine
BAE33	Oumlil	-77	Grp. Ouarzazate	Veine
BAE34a	Tamdrost	-20	Grp. Ouarzazate	Min. massives
BAE34b	Zone D	-200	roche verte	Veine
BAE34c	Zone D	-200	roche verte	Veine
BAE35	Zone D	-200	roche verte	Veine
BAE36b	BAC - P3	-420	Diorite quartzite	Veine
BAE36c	BAC - P3	-420	Diorite quartzite	Veine
BAE37c	BAC - P3	-420	Diorite quartzite	Veine
BAE37d	BAC - P3	-420	Diorite quartzite	Veine
BAE37f	BAC - P3	-420	Diorite quartzite	Veine
BAE38a	Filon 53	-200	Diorite quartzite	Diorite quartzite
BAE38b	Filon 53	-200	Diorite quartzite	Veine
BAE39a	Filon 53	-115	Diorite quartzite	Veine
BAE39b	Filon 53	-115	Diorite quartzite	diorite
BAE39c	Filon 53	-154	Diorite quartzite	Min. massives
BAE40	Filon 53	-154	Diorite quartzite	Min. massives
BAE41	Filon 53	-154	Diorite quartzite	Min. massives
BAE42a	Filon 55 - Carrière	surface	serpentine	Veine
BAE42b	Filon 55 - Carrière	surface	serpentine	Veine
BAE43	Filon 52 - Carrière	surface	serpentine	Veine
BAE44a1	BAE - P3	-320	contact serp/diorite	Min. massives
BAE44a2	BAE - P3	-320	contact serp/diorite	Min. massives
BAE44b	BAE - P3	-320	contact serp/diorite	Min. massives
BAE45	BAE - P3	-320	Diorite quartzite	Min. massives
BAE46a	BAE - P6	-510	Diorite quartzite	Min. massives
BAE46b	BAE - P6	-510	Diorite quartzite	Min. massives
BAE46c	BAE - P6	-510	Diorite quartzite	Min. massives
BAE47a	Taghouni - taille 2 cr	-80	Diorite quartzite	Veine
BAE47b	Taghouni - taille 2 cr	-80	Diorite quartzite	Veine
BAE48a	Taghouni - FP	-120	Diorite quartzite	Veine/fente de tension
BAE48b	Taghouni - FP	-120	Diorite quartzite	Veine/fente de tension
BAE49a	Taghouni - ST2bis	-120	Diorite quartzite	Diorite quartzite
BAE49b	Taghouni - ST2bis	-120	Diorite quartzite	Veine/fente de tension

BAE49c	Taghouni - ST2bis	-120	Diorite quartzite	Veine/fente de tension
BAE49d	Taghouni - ST2bis	-120	Diorite quartzite	Veine/fente de tension
BAE50a	BAE - Carrière 2	surface	contact serp/Rverte	Min. massives
BAE50b	BAE - Carrière 2	surface	contact serp/Rverte	Min. massives
BAE50c	BAE - Carrière 2	surface	contact serp/Rverte	Min. massives
BAE51a	BAE - Carrière 2	surface	Rverte	Rverte
BAE51b	BAE - Carrière 2	surface	Rverte	Rverte
BAE52a	BAE - Carrière 3	surface	contact serp/Grp. Ouarzazate	birbiritte
BAE52b	BAE - Carrière 3	surface	contact serp/Grp. Ouarzazate	birbiritte
BAE53	Aghbar	-405	contact serp/Grp. Ouarzazate	Veine
BAE54	Aghbar	-405	contact serp/Grp. Ouarzazate	Veine
BAE55	Aghbar	-405	contact serp/Grp. Ouarzazate	Veine
BAE56	Aghbar	-405	contact serp/Grp. Ouarzazate	Min. massives
BAE57a	Aghbar	-405	contact serp/Grp. Ouarzazate	Min. massives
BAE57b	Aghbar	-405	contact serp/Grp. Ouarzazate	Min. massives
BAE58a	Taghouni	surface	intra tidiline?	diorite?
BAE58b	Taghouni	surface	intra tidiline?	diorite ou gabbro
BAE59a	Filon 53	-240	intraserp	Poche
BAE59b	Filon 53	-240	intraserp	Poche
BAE59c	Filon 53	-240	intraserp	Poche
BAE60	Filon 53	-240	Diorite quartzite	Veine
BAE61	Filon 52 - Carrière	surface	intraserp	Min. massives
BAE62a	Zone D	surface	contact serp/Rverte	carapace/birbiritte
BAE62b	Zone D	surface	contact serp/Rverte	carapace/birbiritte
BAE63a	Bouismass - Cm4	-390	contact serp/diorite	Min. massives
BAE63b	Bouismass - Cm4	-390	contact serp/diorite	Min. massives
BAE63c	Bouismass - Cm4	-390	contact serp/diorite	Min. massives
BAE63d	Bouismass - Cm4	-390	contact serp/diorite	Min. massives
BAE64a	Filon 55 - Carrière	surface	intraserp	Min. massives
BAE64b	Filon 55 - Carrière	surface	intraserp	Min. massives
BAE64c	Filon 55 - Carrière	surface	intraserp	gabbro/diorite?
BAE64d	Filon 55 - Carrière	surface	intraserp	gabbro/diorite?
BAE64g	BAE - tranchée	surface	contact serp/Grp. Ouarzazate	Min. massives
BAE65a	BAE - tranchée	surface	contact serp/Grp. Ouarzazate	Min. massives
BAE65b	BAE - tranchée	surface	contact serp/Grp. Ouarzazate	Min. massives
BAE65c1	BAE - tranchée	surface	contact serp/Grp. Ouarzazate	Min. massives
BAE65c2	BAE - tranchée	surface	contact serp/Grp. Ouarzazate	Min. massives
BAE65c3	BAE - tranchée	surface	contact serp/Grp. Ouarzazate	Min. massives
BAE65c4	BAE - tranchée	surface	contact serp/Grp. Ouarzazate	Min. massives
BAE66a1	BAC - P3	-420	intradiorite	Min. massives/Veine?
BAE66a2	BAC - P3	-420	intradiorite	Min. massives/Veine?
BAE66b	BAC - P3	-420	intradiorite	Min. massives/Veine?
BAE66c	BAC - P3	-420	intradiorite	Min. massives/Veine?
BAE66d	BAC - P3	-420	intradiorite	Min. massives/Veine?
BAE67a	Filon 2	surface	intraserp	Veine



BAE67b	Filon 2	surface	intraserp	lave Grp. Ouarzazate
BAE68a	Filon 53 - ST9	-240	Diorite quartzite	Poche
BAE68b	Filon 53 - ST9	-240	Diorite quartzite	Poche
BAE68c	Filon 53 - ST9	-240	Diorite quartzite	Poche
BAE68d	Filon 53 - ST9	-240	Diorite quartzite	Poche
BAE68f	Filon 53 - ST6	-240	Diorite quartzite	Poche
BAE69a	Filon 53 - ST6	-240	Diorite quartzite	Veine
BAE69b	Filon 53 - ST6	-240	Diorite quartzite	Veine
BAE69c	Filon 53 - ST6	-240	Diorite quartzite	Veine
BAE69d	Filon 53 - ST6	-240	Diorite quartzite	Veine
BAE69e	Filon 53 - ST6	-240	Diorite quartzite	Veine
BAE70a	Filon 53 - ST5	-240	Diorite quartzite	Diorite quartzite
BAE70b	Filon 53 - ST5	-240	Diorite quartzite	Veine
BAE70c	Filon 53 - ST5	-240	Diorite quartzite	Veine
BAE71a	Bouismass	-390	contact serp/diorite	Min. massives
BAE71b	Bouismass	-390	contact serp/diorite	Min. massives
BAE71c	Bouismass	-390	contact serp/diorite	Min. massives
BAE71d	Bouismass	-390	contact serp/diorite	Min. massives
BAE71e	Bouismass	-390	contact serp/diorite	Min. massives
BAE72a	BAE - P3	-302	contact serp/diorite	Min. massives
BAE72b	BAE - P3	-302	contact serp/diorite	Min. massives
BAE72c	BAE - P3	-302	contact serp/diorite	Min. massives
BAE72d	BAE - P3	-302	contact serp/diorite	Min. massives
BAE72e	BAE - P3	-302	contact serp/diorite	Min. massives
BAE72f	BAE - P3	-302	contact serp/diorite	Min. massives
BAE72g	BAE - P3	-302	contact serp/diorite	Min. massives
BAE73a	BAE - P3	-302	contact serp/diorite	Veine
BAE73b	BAE - P3	-302	contact serp/diorite	Veine
BAE73c	BAE - P3	-302	contact serp/diorite	Veine
BAE74a	BAE - P3	-302	contact serp/diorite	diorite
BAE74c	BAE - P3	-302	contact serp/diorite	diorite
BAE75	Taghouni	-80	contact serp/diorite	roddingite
BAE76a	Tranché BAE P3	surface	contact serp/Grp. Ouarzazate	contact
BAE76b	Taghouni	-80	contact serp/diorite	roddingite

Annexe II.2.1, Microprobe analysis Rammelsbergite chemical results (wt. %)

Locality (m)		Fe	Cu	Pb	S	Co	Ni	Zn	As	Total
<b>Serpentinite host rock (BAE P6, Lvl -510) n=6</b>										
	Mean	0,24	0	0	0,26	7,69	20,47	0	71,57	100,30
	Std dev	0,13	0	0	0,08	2,43	2,52	0	0,17	
	Min	0,06	0	0	0,16	3,28	18,07	0	71,39	100,06
#Co=0.27	Max	0,44	0	0	0,35	9,85	24,99	0	71,86	100,53
<b>The massive mineralisation - carbonated gangue (Bouismass, Lvl -390 / P2) n=8</b>										
	Mean	0,89	0	0	5,28	6,62	23,01	0	65,45	101,26
	Std dev	0,50	0	0	1,08	2,25	2,35	0	1,42	
	Min	0,29	0	0	3,06	3,01	19,45	0	63,95	100,76
#Co=0.24	Max	1,53	0	0	6,74	10,02	25,48	0	68,55	101,72

Annexe II.2.2, Microprobe analysis Nickeline chemical results (wt. %)

Locality (m)		Fe	Cu	Pb	S	Co	Ni	Zn	As	Total
<b>Serpentinite host rock (BAE P6, Lvl -510) n=3</b>										
	Mean	0,028	0	0,02	0,09	1,52	41,67	0	56,90	100,28
	Std dev	0,012	0	0,01	0	0,80	2,05	0	0,91	
	Min	0,017	0	0,	0,08	0,93	39,31	0	56,31	99,98
#Co= 0.03	Max	0,042	0	0,03	0,05	2,44	43,03	0	57,96	100,54
<b>The massive mineralisation - carbonated gangue (Bouismass, Lvl -390 / P2) n=15</b>										
	Mean	0,18	0	0,004	0,017	0,25	43,60	0	56,70	100,75
	Std dev	0,24	0	0,007	0,03	0,20	0,76	0	0,32	
	Min	0,01	0	0	0	0,08	41,34	0	56,12	99,839
#Co=0.005	Max	0,82	0	0,024	0,12	0,72	44,31	0	57,36	101,42

Annexe II.2.3, Microprobe analysis Skutterudite chemical results (wt. %)

Locality (m)	Fe	Cu	Pb	S	Co	Ni	Zn	As	Total
<b>The massive mineralisation - serpentized gangue (BAE P6, Lvl -510) n=46</b>									
Mean	1,89	0	0	0,92	17,75	1,31	0	78,8	100,69
Std dev	1,02	0	0	0,47	1,32	0,93	0	1,21	
Min	0,54	0	0	0,08	14,88	0,09	0	72,5	92,65
Max	3,82	0,01	0,01	1,63	19,73	4,03	0	80,43	101,61
<b>The massive mineralisation - carbonated gangue (Agbar, Lvl -325 - Bouismass, Lvl -390 / P2) n=40</b>									
Mean	3,15	0	0	1,19	15,23	2,71	0,0	78,63	100,97
Std dev	0,79	0	0	0,87	1,99	1,43	0,3	1,12	
Min	1,67	0	0	0,15	11,14	0,1	0	76,56	100,07
Max	4,8	0	0,01	2,89	19,53	5,74	1,8	80,73	102,17
<b>The veins (Bouismass, Lvl -390 / P2) n=7</b>									
Mean	3,67	0	0	1,4	15,22	2,23	0	78,32	100,85
Std dev	1,37	0	0	0,87	2,18	1,08	0	1,13	
Min	1,88	0	0	0,48	11,48	0,98	0	77,06	100,53
Max	5,49	0	0	2,34	17,87	4,17	0	79,48	101,1

Annexe II.2.4, Microprobe analysis Cobaltite chemical results (wt. %)

Locality (m)	Fe	Cu	Pb	S	Co	Ni	Zn	As	Total
<b>Pockets (Filon 53, Lvl -240) n=24</b>									
Mean	3,61	0	18,9	0	26,04	5,16	0	47,18	100,9
Std dev	1,23	0	0,74	0	4,05	3,62	0	1,15	
Min	1,74	0	16,78	0	20,43	0,03	0	45,7	100,04
Max	5,74	0,02	19,82	0	32,78	10,8	0	50,29	101,83
<b>The massive mineralisation - serpentized gangue (BAE P6, Lvl -510) n=2</b>									
Mean	4	0	18,62	0	23,12	5,97	0	45,1	96,82
Std dev	1,55	0	1,58	0	9,27	5,43	0	1,56	
Min	2,91	0	17,5	0	16,56	2,13	0	44	92,97

Max	5,09	0	19,74	0	29,68	9,81	0	46,21	100,67
-----	------	---	-------	---	-------	------	---	-------	--------

**The massive mineralisation - carbonated/siliceous gangue (Bouismass, Lvl -390 / P2)n=2**

Mean	1,59	0	13,78	0	21,39	10,08	0	54,12	100,98
Std dev	0,08	0	2,27	0	1,03	0,07	0	3,06	
Min	1,54	0	12,17	0	20,66	10,03	0	51,96	100,91
Max	1,65	0	15,38	0	22,12	10,14	0	56,28	101,04

**The veins (BAE P3, Quarry 2) n=10**

Mean	1,91	0	18,82	0	24,94	7,8	0	46,72	100,2
Std dev	0,61	0	0,59	0	4,15	4,21	0	0,94	
Min	0,89	0	17,8	0	19,93	0,6	0	45,47	99,41
Max	2,8	0	19,53	0	32,34	14,22	0	48,23	100,96

Annexe II.2.5, Microprobe analysis Loellingite chemical results (wt. %)

Locality (m)	Fe	Cu	Pb	S	Co	Ni	Zn	As	Total
--------------	----	----	----	---	----	----	----	----	-------

**The veins (Bouismass, Lvl -390 / P2, BAE P3, Quarry 2, BAE P6, Lvl -510) n=19**

Mean	21,95	0,01	0,18	1,02	6,36	0,03	0	70,51	100,14
Std dev	7,01	0,01	0,39	1,21	7,29	0,12	0	3,14	
Min	7,66	0	0	0	0,11	0	0	60,88	87,94
Max	28,66	0,04	1,33	4,26	21,48	0,51	0	73,3	102,32

**Pockets (Filon 53, Lvl -240) n=23**

Mean	25,08	0	0,39	0	2,81	0,23	0	73,18	101,76
Std dev	2,53	0	0,32	0,01	2,19	0,46	0	0,63	

Min	17,58	0	0,13	0	0,32	0	0	71,05	101,08
Max	27,7	0	1,62	0,02	8,65	2,08	0	73,85	102,32

**Quartz diorite host rock (Axe Million, Lvl -80) n=29**

Mean	26,41	0,01	0,19	0,31	1,78	0,01	0	72,5	101,33
Std dev	2,55	0,01	0,3	0,36	2,22	0,01	0	1,7	
Min	19,48	0	0	0	0,21	0	0	63,98	88,77
Max	28,52	0,04	0,94	1,17	7,97	0,04	0	73,57	102,39

**The veins in the The massive mineralisation (Aghbar, Lvl -405) n=28**

Mean	28,01	0,07	0	0,95	0,07	0	0	71,7	100,87
Std dev	1,07	0,05	0,01	0,95	0,01	0,01	0	2,28	
Min	22,86	0,01	0	0,06	0,05	0	0	61,92	85,63
Max	29,46	0,21	0,02	3,85	0,1	0,03	0	73,38	102,14

**The massive mineralisation - carbonated/siliceous gangue (Bouismass, Lvl -390 / P2, Aghbar, Lvl-325) n=28**

Mean	17,52	1,32	0,06	2,75	6,06	5,26	0	68,2	101,23
Std dev	4,77	5,62	0,32	5,59	3,35	3,69	0	12,39	0,84
Min	10,11	0	0	0,04	0,15	0	0	5,98	98,23
Max	27,97	$\frac{29,6}{7}$	1,67	30,59	12,49	12,17	0,3	73,34	102,69

---

Annexe II.2.6, Microprobe analysis Calcite chemical results (%wt)

Location	Al2O3	SiO2	Cl	TiO2	Na2O	MgO	MnO	FeO	SO2	K2O	CaO	Cr2O3	CoO	NiO	As2O3	Total
<b>Cross-cutting structure type</b> (Bouismass, lvl -390 / P2 - BAE P3, Quarry 2 - BAE P6, lvl -510)																
mean	0,02	0,09	0,01	0,01	0,01	2,87	0,83	2,64	0,00	0,01	50,52	0,01	0,01	0,01	0,01	57,38
Std dev	0,07	0,27	0,01	0,01	0,01	5,60	0,86	5,34	0,01	0,06	11,94	0,01	0,01	0,01	0,01	3,30
min	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	0,00	27,70	0,00	0,00	0,00	0,00	47,94
max	0,45	1,66	0,06	0,04	0,04	19,24	3,29	15,95	0,03	0,38	60,94	0,04	0,05	0,05	0,04	61,98
<b>Contact type - calcite/quartz gangue</b> (Bouismass, lvl -390 / P2 - Aghbar, lvl-325)																
mean	0,01	0,05	0,03	0,01	0,02	0,17	0,53	0,17	0,01	0,02	57,61	0,02	0,02	0,01	0,01	58,68
Std dev	0,01	0,04	0,11	0,01	0,05	0,14	0,27	0,11	0,01	0,05	2,47	0,03	0,05	0,02	0,01	2,43
min	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	49,25	0,00	0,00	0,00	0,00	51,15
max	0,05	0,27	0,79	0,05	0,38	0,54	2,01	0,49	0,02	0,32	60,48	0,20	0,23	0,09	0,04	62,26
<b>Pockets</b> (Filon 53, lvl -240)																
mean	0,01	0,04	0,01	0,02	0,02	0,00	0,52	0,05	0,01	0,01	53,53	0,02	0,01	0,00	0,00	54,25
Std dev	0,01	0,04	0,00	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,83
min	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,46	0,01	0,00	0,00	44,78	0,00	0,00	0,00	0,00	45,55

max	0,02	0,07	0,02	0,04	0,06	0,02	0,58	0,11	0,02	0,01	59,58	0,03	0,05	0,03	0,01	60,27
-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-------	------	------	------	------	-------

**Pocket on surface (BAE P3, Quarry 2)**

mean	0,05	0,53	0,02	0,01	0,01	1,91	0,49	0,35	0,00	0,00	55,42	0,06	0,01	0,01	0,00	58,86
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-------	------	------	------	------	-------

Std dev	0,16	1,13	0,02	0,01	0,02	5,43	0,19	0,30	0,00	0,00	7,21	0,16	0,01	0,01	0,00	3,22
---------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

min	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,17	0,40	0,18	0,00	0,00	31,38	0,00	0,00	0,00	0,00	49,16
-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-------	------	------	------	------	-------

max	0,64	4,17	0,06	0,02	0,06	21,45	1,17	1,34	0,01	0,01	58,66	0,64	0,03	0,02	0,01	62,71
-----	------	------	------	------	------	-------	------	------	------	------	-------	------	------	------	------	-------

**Cross-cutting structure type in the contact type (Aghbar, lvl -405)**

mean	0,00	0,04	0,02	0,01	0,03	0,33	0,59	0,13	0,00	0,01	58,58	0,01	0,00	0,00	0,00	59,77
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-------	------	------	------	------	-------

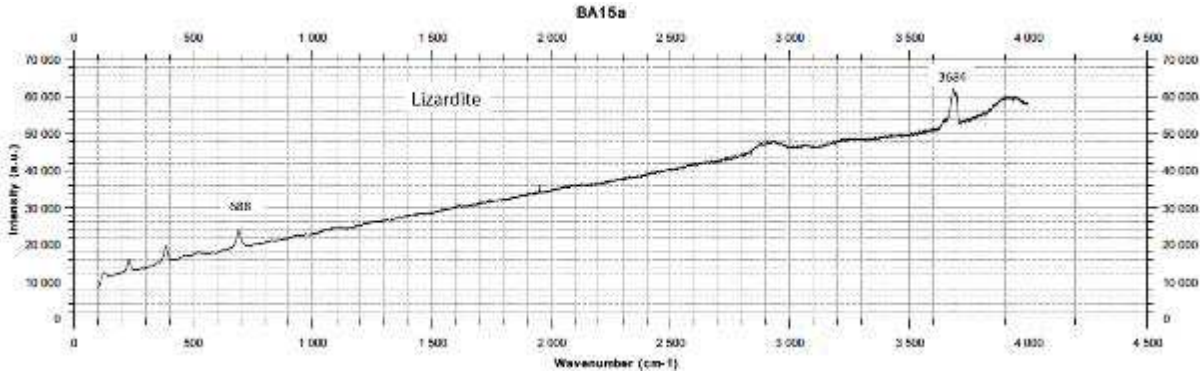
Std dev	0,00	0,01	0,02	0,01	0,04	0,18	0,10	0,05	0,00	0,02	1,87	0,01	0,01	0,01	0,01	1,79
---------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

min	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,12	0,46	0,06	0,00	0,00	53,98	0,00	0,00	0,00	0,00	55,35
-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-------	------	------	------	------	-------

max	0,01	0,05	0,05	0,03	0,13	0,60	0,79	0,22	0,01	0,05	60,85	0,03	0,02	0,02	0,03	61,77
-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-------	------	------	------	------	-------

---

Annexe II.3: signal in Raman spectrometry and associated peaks





# **Textural and mineralogical constraints on the mode of formation of the Bou Azzer Co-Ni arsenide mineralization (Anti-Atlas, Morocco): Tectonic implications.**

---

**Enora Tourneur, Alain Chauvet**

*University of Montpellier, France*

**Kalin Kouzmanov**

*University of Geneva, Switzerland*

**Johann Tuduri**

*BRGM, France*

**Stanislas Sizaret**

*ISTO, Geosciences Campus, France*

**Abstract.** The Bou Azzer inlier is thought to represent a suture zone within a Neoproterozoic orogeny. The Bou Azzer inlier is composed of an assumed ancient oceanic crust of serpentinized ultramafic rocks, gabbro and basaltic pillow rocks. This inlier hosts the Co-Ni ore deposit of Bou Azzer with two types of mineralization: i) massive, elongated ore bodies, known as “*contact*” type mineralization, along the contact between serpentinite, quartz diorite and Precambrian volcanic rocks; and ii) a “*cross-cutting*” type represented by faults that cut all units, only mineralized at the vicinity of the “*contact*” type. A detailed mineralogical and textural study brings new arguments on the ore-formation processes at Bou Azzer. First, it appears that both types of mineralization are developed within a progressive and continuous tectono-hydrothermal stage as shown by the mineralogical evolution. Second, the “*contact*” type exhibits two aspects: i.e., Laminated Contact Mineralization (LCM) and Breccia-Related Contact Mineralization (BRCM) that are related to different initial textures of the pre-mineralization host rocks. Third, Ni-Co mineralization seems to have developed by replacement of spinel/magnetite grains of the serpentinite. All these observations are consistent with ore formation along a tectonic contact which explains the existence of serpentinite fragments slope breccia.

# 1 Introduction

Various cobalt mineralization styles on Earth cannot be attributed to a single ore-forming model. At least, six major mineralization styles are known: 1) sediment-hosted stratiform Cu-Co deposits (Fay and Barton 2012); 2) ortho-magmatic sulfide deposits (Naldrett et al. 1998); 3) Co from lateritic profiles mainly exploited for Ni (Orloff 1968); 4) Co-rich crusts associated with Mn-nodules within seawater hydrothermal oxidizing venting environment (Hein et al. 2000); 5) hydrothermal/volcanogenic deposits (the Bou Azzer district) (Leblanc 1975; En-naciri 1995); 6) Five elements (Ni-Co-As-Ag-Bi) vein-type deposits (Kissin 1988; Markl et al. 2016; Burish et al. 2017). At Bou Azzer, two types of ore bodies exist – the “contact” and the “cross-cutting” types. Yet, their mode of formation remains unclear, especially regarding their relationship with large-scale geodynamic processes. In this study, we present and discuss: i) mineralogical and paragenetic features that favor coeval processes of formation for the two mineralization types at Bou Azzer; ii) new textural observations helping to discuss the pre-mineralization tectonic context and its implication on the presently admitted classical model of Precambrian ophiolite for the Bou Azzer inlier (Leblanc 1976, Gasquet et al. 2005).

## 2 The Bou Azzer – El Graara inlier and the deposits

The Bou Azzer – El Graara inlier, oriented NW-SE, is located in the central part of the Moroccan Anti-Atlas, south of Ouarzazate. This inlier is composed of a dismembered but complete sequence of an assumed ancient oceanic crust made of serpentinized ultramafic rocks overlaid by gabbroic and

basaltic pillow rocks (Leblanc 1975, 1976, 1981; Bodinier et al. 1984). This area is thus interpreted as being a suture zone related to the Neoproterozoic orogeny (e.g. Choubert 1963; Leblanc and Lancelot 1980; Saquaque 1992). The tectono-magmatic evolution of this area (Tuduri et al. 2018) involves a first event, associated with the emplacement of large volumes of high-K calc-alkaline magmas in meta-sediments that were deformed under transpressive tectonic control (the Lower Complex). A second transtensive deformational event is associated with intense magmatism, volcanism and deposition of volcano-clastic sediments (the Upper Complex). The Precambrian group of Ouarzazate, characterizing the Upper Complex, is composed of dacitic to rhyolitic ignimbrites and andesitic tuffs (Mifdal and Peucat 1985); all intruded by a calc-alkaline to highly potassic plutonic rocks. All these Precambrian units are covered by the Cambrian sedimentary cover (Pouit 1966; Bouchta et al. 1977; Gasquet et al. 2001).

## 3 Textural and paragenetic constraints on the mineralization

### 3.1 The Co-Ni ore deposits of Bou Azzer

Two types of ore bodies occur in the Bou Azzer district, as defined by Leblanc (1975) and En-naciri (1995) (Fig. 1):

i) The massive “*contact*” type is composed by Co-Ni-Fe arsenides hosted within a siliceous or carbonaceous gangue. This mineralization is developed systematically at the contact between serpentinites and quartz-diorite and/or Upper complex volcanic rocks, located

south and north of the serpentinite occurrences, respectively.

ii) The “cross-cutting” type is composed of Co-Fe arsenide mineralization, within K-feldspar, quartz and carbonate veins. These veins intersect all units, and are only mineralized at the vicinity of the “contact” type ore bodies.

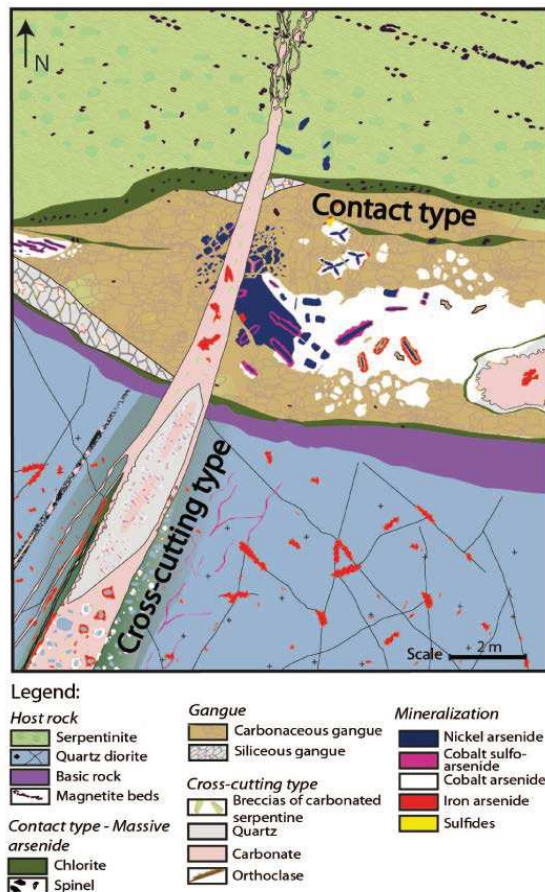


Figure 1. Model of formation of the Bou Azzer Co-Ni-rich arsenide ore deposit showing the distribution of the mineralization stages within the “contact” and the “cross-cutting” type mineralization.

Six paragenetic stages are recognized at Bou Azzer: 1) a Ni-arsenide stage with nickeline (NiAs) and rammelsbergite (NiAs<sub>2</sub>); 2) a Co-arsenide stage with skutterudite (CoAs<sub>3</sub>) and safflorite (CoAs<sub>2</sub>); 3) a Co-sulfo arsenide stage with cobaltite (CoAsS); 4) a Fe-arsenide stage with loellingite (FeAs<sub>2</sub>); 5) a Fe sulfo-arsenide stage with arsenopyrite (FeAsS); and 6) a sulfide stage with chalcopyrite, sphalerite, galena, and fahlores. The six stages are observed within the contact type mineralization, all included in a

carbonaceous and a siliceous gangue, whereas only the last four stages occur in the “cross-cutting” type.

A petro-structural model is proposed in order to integrate the six mineralization stages within three main events which lead to the formation of the Bou Azzer deposits (Fig. 1):

1) a Ni-Co-rich arsenide stage composed of nickeline, rammelsbergite and subsequent cobaltite and skutterudite;

2) the formation of the siliceous or carbonaceous gangue associated with the late Co-rich arsenide and the earlier Fe-rich sulfo-arsenide minerals;

3) the formation of the cross-cutting structures mainly hosts the final stage of the Co-rich arsenide mineralization and the Fe-Cu-bearing sulfide minerals, both occurring in veins mainly composed of K-feldspar (minor), quartz and carbonate.

### 3.2 Textural observations on the massive type

A detailed textural analysis of the “contact” type mineralization led to the following observations:

1. The massive arsenide-rich parts of the mineralization show two distinct textural features:

- Massive lenses of lamellar nickeline surrounded by skutterudite sometimes alternating with carbonate forming a banded texture (Fig. 2a).

- Massive lenses of arsenides with isolated nuclei of elongated rammelsbergite surrounded by cobaltite, carbonate, skutterudite and chalcopyrite, all included within large euhedral skutterudite and with late carbonate (Fig. 2b);

2. The gangue of the contact mineralization is mainly carbonaceous and may exhibit several inherited fragments of serpentinite (Fig. 3a), indicating the nature of the host rock (serpentinite) prior to the formation of the mineralized structure;

3. Skutterudite is commonly fractured, with neo-serpentine infilling (Fig. 3b). This demonstrates that the serpentinization was still active during at least the earliest

mineralization stages.

4. Spinel and rammelsbergites entirely replaced by spinel are observed within the serpentinite close to the contact (Fig. 3b). Spinel is systematically bordered by magnetite (Fig. 3c) or rammelsbergite (Fig. 3b). In addition, cathodoluminescence imaging shows relics of spinel frequently occurring in the core of the carbonaceous gangue (Fig. 3c). This demonstrates again that serpentinite was the precursor of the mineralized gangue.

5. Cathodoluminescence imaging of the carbonaceous gangue shows that two textures co-exist: i) one dominated by large euhedral crystals evolving toward, ii) fragmented grains with a lot of space between them. This last texture seems to be related to dilatation breccia formed within a stress-free open space (Fig. 3d) (Jébrak 1997; Chauvet 2019).

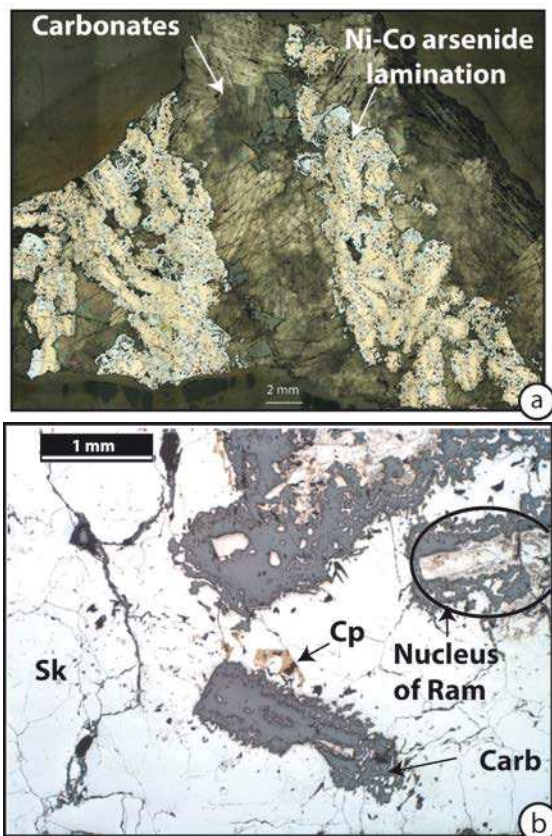


Figure 2. a. The “contact” type composed of laminated contact mineralization (LCM) of Ni-Co rich arsenide then surrounding by carbonate (image in reflected light). b. Nucleus of Rammelsbergite surrounding by skutterudite, carbonate, chalcopyrite, in a massive gangue of skutterudite and carbonates, indicates a brecciated-related environment of the contact mineralization (BRCM) (image in reflected light). Carb: carbonate, Co: Cobalt, Cp: Chalcopyrite, Ni: Nickel, Ram: Rammelsbergite, Sk: skutterudite

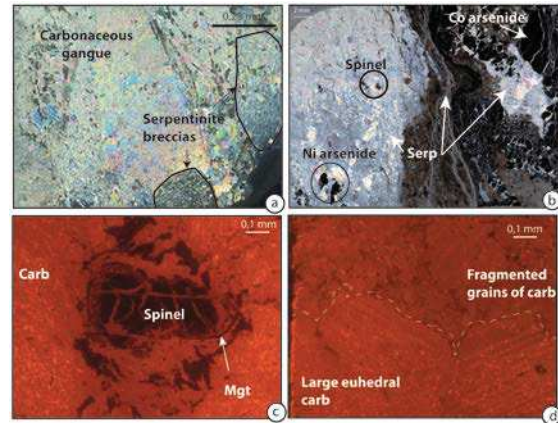


Figure 3. a. Fragments of a previously serpentinite in the carbonaceous gangue (image in polarized light) b. Few information of texture is visible: fractured skutterudite by serpentinite, spinel entirely replaced by rammelsbergite, spinel is observed in the serpentinite host rock (image in polarized light). c. Spinel is included also in the carbonaceous gangue of the “contact” type, is bordered by magnetite (image of cathodoluminescence – CL). d. The carbonaceous gangue shows two types of texture: brecciated texture of thin carbonates and euhedral texture of large carbonates (image of CL). Carb: carbonate, Co: Cobalt, Mgt: Magnetite, Ni: Nickel, Ram: Rammelsbergite, Serp: serpentinite

## 4 Formation of the Bou Azzer ore deposit and tectonic implications

We draw two main conclusions from the textural and mineralogical analysis of the Bou Azzer mineralization:

- The mineralogical evolution of both “contact” and “cross-cutting” mineralization types results from a progressive and continuous process that begins with Ni-Co ore formation followed by Co-Fe-Cu-rich stages. The Ni-Co stages are encountered exclusively within the “contact” type while the Co/Fe/Cu stages developed in both structures. This suggests that both mineralization types, i.e. the contact and the cross-cutting ones, are produced during the same tectono-mineralogical event, although the “contact” type ore bodies formed first.

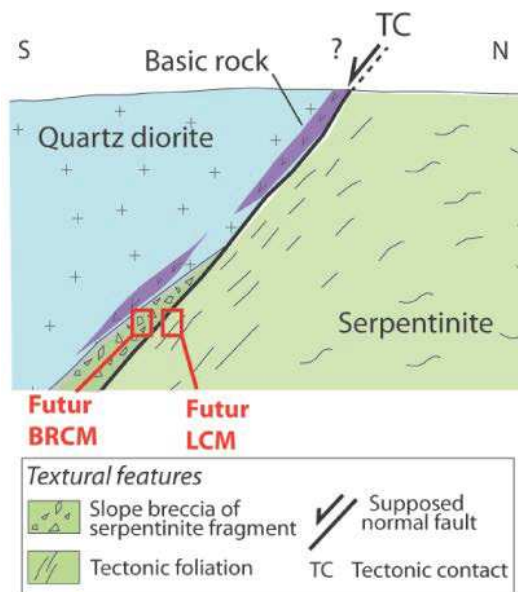


Figure 4. An example of hypothetical tectonic context consistent with the formation of serpentinite breccia that serves as receptacle for mineralization. In that case, fault motion need to be normal. (BRCM: Brecciated-related contact mineralization; LCM: Laminated contact mineralization)

- The textural features within the “contact” type demonstrate that these domains result from replacement and hydrothermal processes that affect a serpentinite rock. Textural constraints indicate that most of the ore bodies derived from serpentinite breccia could form Breccia-related Contact Mineralization (BRCM); although some may have been formed by the transformation of banded serpentinite levels, Laminated Contact Mineralization (LCM) (Fig. 4). It is suggested that such brecciated areas, characterized by high permeability, are favorable domains for fluid circulation and subsequent ore formation.

- The occurrence of spinel relics bordered by magnetite and rammelsbergite confirms the hypothesis of replacement of serpentinite levels. It is suggested that spinel and magnetite fragments are at the origin of the Ni/Co-rich arsenides whereas serpentinite ones formed the gangues.

A first hypothesis regarding the tectonic context of ore formation at Bou Azzer is illustrated in figure 4. The brecciated levels, as precursors for the formation of the contact orebodies can result from the activity of normal faults and the geometrical constraints

of the inlier. Such normal faults may have helped the exhumation of the serpentinized mantle in this area. However, they are inconsistent with the obduction scenario.

## Acknowledgements

Managem and CTT mining companies are acknowledged for their support during field work and access to the mine sites. Part of the laboratory work was supported by the TelluS Program of CNRS/INSU. We also acknowledge Christophe Nevado and Doriane Delmas for their meticulous works on thin sections.

## References

- Bodinier JL, Dupuy C, Dostal J (1984) Geochemistry of Precambrian ophiolites from Bou Azzer, Morocco. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 87(1):43–50. doi.org/10.1007/BF00371401
- Bouchta R, Boyer F., Routhier P, Saadi M, Salem M (1977) L'aire cuprifère de l'Anti-Atlas (Maroc) : permanence et arêtes riches. *C. R. Acad. Sc. Paris* 284:503–506
- Bursich M, Gerdes A, Walter B, Neumann U, Fettel M, Markl G (2017) Methane and the origin of five-element veins: Mineralogy, age, fluid inclusion chemistry and ore forming processes in the Odenwald, SW Germany. *Ore Geology Reviews* 81:42–61. doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.10.033
- Chauvet A. (2019) Structural Control of Ore Deposits: The Role of Pre-Existing Structures on the Formation of Mineralised Vein Systems. *Minerals* 9(1):56
- Choubert G. (1963) Histoire géologique du Précambrien de l'Anti-Atlas de l'Archéen à l'aurore des temps primaires. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc* 162:352
- El Hadi H, Simancas JF, Martínez-Poyatos D, Azor A, Tahiri A, Montero P, Fanning CM, Bea F, González-Lodeiro F (2010) Structural and geochronological constraints on the evolution of the Bou Azzer Neoproterozoic ophiolite (Anti-Atlas, Morocco). *Precambrian Research* 182:1-14
- En-naciri A (1995) Contribution à l'étude du district à Co, As, (Ni, Au, Ag) de Bou Azzer, Anti-Atlas (Maroc). *Données minéralogiques et géochimiques: Etude des inclusions fluides*. MGeol thesis University of Orleans
- Gasquet D, Levresse G, Cheilletz A, Azizi-Samir MR, Mouttaqi A (2005) Contribution to a geodynamic reconstruction of the Anti-Atlas (Morocco) during Pan-African times with the emphasis on inversion tectonics and metallogenic activity at the Precambrian-Cambrian transition. *Precambrian Research* 140:157–182. doi.org/10.1016/j.precamres.2005.06.009
- Hein JR, Koschinsky A, Bau M, Manheim FT, Kang JK, Roberts L (2000) Cobalt rich ferromanganese crusts in the Pacific: In *Marine mineral deposits*, 1st edition, CRC Press, New York, pp 239–279
- Inglis JD, D'Lemos RS, Samson SD, Admou H (2005) Geochronological Constraints on Late Precambrian Intrusion, Metamorphism, and Tectonism in the Anti-Atlas Mountains. *The Journal of Geology* 113:439–450
- Jébrak M. (1997) Hydrothermal breccias in vein-type ore

- deposits: A review of mechanisms, morphology and size distribution. *Ore Geology Reviews* 12:111-134
- Kissin SA (1992) Five-element (Ni-Co-As-Ag-Bi) veins: *Geoscience Canada* 19(3):113–124
- Kissin SA (1988) Nickel-cobalt-native silver (five element) veins: A rift-related ore type, in Kisvarsanyi, G. and Grant, SK, eds., *Proceedings Volume, North American Conference on Tectonic Control of Ore Deposits and the Vertical and Horizontal Extent of Ore Systems*. University of Missouri-Rolla, pp. 268-279
- Leblanc M (1975) Ophiolites précambriennes et gîtes arseniés de cobalt (Bou Azzer, Maroc). MGeol thesis University of Montpellier
- Leblanc M (1976) Proterozoic oceanic crust at Bou Azzer. *Nature* 261:34–35
- Leblanc M (1981) The Late Proterozoic ophiolites of Bou Azzer (Morocco): evidence for Pan-African plate tectonics. In A. Kröner (Editor), *Precambrian Plate Tectonics*, Amsterdam, pp 435-451
- Leblanc M, Lancelot JR. (1980) Interprétation géodynamique du domaine panafricain (Précambrien terminal) de l'Anti-Atlas (Maroc) à partir de données géologique et géochronologique. *Canadien Journal of Earth Sc* 17:142-155
- Markl G, Burisch M, Neumann U (2016) Natural fracking and the genesis of five-element veins. *Mineralium Deposita* 51(6):703–712. doi.org/10.1007/s00126-016-0662-z
- Mifdal A, Peucat JJ (1985) Datations U/Pb et Rb/Sr du volcanisme acide de l'Anti-Atlas marocain et du socle sous-jacent dans la région de Ouarzazate. Apport au problème de la limite Précambrien-Cambrien. *Sciences Géologique Bulletin* 38:185–200
- Naldrett AJ, Federenko VA, Lightfoot PC, Gorbachev NS, Doherty W, Asif M, Lin Sh, Johan Z (1998) A model for the formation of the Ni-Cu-PGE deposits of the Noril'sk Region: In *International Platinum, Theophrastus Publication*, St Petersburg, pp 92–106
- Pouit G (1966) Paléogéographie et répartition des minéralisations stratiformes de cuivre dans l'Anti-Atlas occidental (Maroc). *Chron Rech Min* 356: 279-289
- Saquaque A. (1992) Un exemple de suture-arc: Le Précambrien de l'Anti-Atlas centre oriental (Maroc). MGeol thesis Université Cadi Ayyad
- Thomas RJ, Fekkak A, Ennih N, Errami E, Loughlin SC, Gresse PG, Chevalier LP, Liégeois JP (2004) A new lithostratigraphic framework for the Anti-Atlas Orogen, Morocco. *Journal of African Earth Sciences* 39:217-226. doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2004.07.046
- Tuduri J, Chauvet A, Barbanson L, Labriki M, Dubois M, Trapy PH, Maacha L (2018) Structural control, magmatic-hydrothermal evolution and formation of hornfels-hosted, intrusion-related gold deposits: Insight from the Thaghassa deposit in Eastern Anti-Atlas, Morocco. *Ore Geology Reviews*, 97:171–198. doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.04.02

Annexe II.5: As concentration of common rocks and minerals and from Bou Azzer

Rocks and minerals	As concentration (ppm)	Source
<b>Oxide minerals</b>		
Fe oxide (undifferentiated)	up to 2000	Boyle and Jonasson (1973)
Magnetite	2.7 - 41	Baur and Onishi (1969)
fibrous magnetite	400	Leblanc (1975)
magnetite veins	20	Gahlan et al. (2006)
<b>Silicate minerals</b>		
Quartz	0.4-1.3	Baur and Onishi (1969)
Feldspar	<0.1-2.1	Baur and Onishi (1969)
Biotite	1.4	Baur and Onishi (1969)
Amphibole	1.1-2.3	Baur and Onishi (1969)
Olivine	0.08-0.17	Baur and Onishi (1969)
Pyroxène	0.05-0.8	Baur and Onishi (1969)
sulphide in serpentinite	50 and 1000	Leblanc & Fischer (1990)
<b>Carbonate minerals</b>		
Calcite	1 to 8	Boyle and Jonasson (1973)
Dolomite	<3	Boyle and Jonasson (1973)
<b>Igneous rocks</b>		
Apatite	<1 - 1000	Baur and Onishi (1969)
ultrabasic (peridotite, dunite, kimberlite, etc...)	0.03-15.8	smedley et al. (2002)
Serpentinized ultramafic rocks	10 - 450	Hattori et al. (2005); Sullivan (2007)
basalt	0.18-113	smedley et al. (2002)
gabbros	0.06-28	Onishi and Sandell (1955)
diorite, granodiorite	0.09-13.4	Boyle and Jonasson (1973)
rhyolite	3.2-5.4	Ure and Berrow (1982)
Neoproterozoic granitoid intrusions	<10 to ~25	Beraaouz et al. (2004)
<b>Sedimentary rocks</b>		
sandstone	0.6-120	Onishi and Sandell (1955)
<b>Volcanic rocks</b>		
ouarzazate group	100 - 300	Leblanc & Billaud (1982)

## Annexe Chapitre III

**Annexe III.1A : tableau de données moyennes en éléments traces et en métaux des assemblages d'inclusions fluides LVS et LV des minéralisations massives**

ECH	ZONE	Type IF	TAILLE ( $\mu\text{m}$ )	FORME	MINERAL	RAMAN	Te	Tmice	Th	Tmh
BAE46c	G	LVS + inc			QTZ 1.1	H20	-68,5		192,5	
BAE46c	G	LVS			QTZ 1.1	H20	-73,2	-41,3	180	
BAE46c	G	LVS + inc			QTZ 1.1		-66,7	-36,6	191,5	
BAE46c	G	LVS			QTZ 1.1	H20	-70	-48,5		307,5
BAE46c	G	V			QTZ 1.1					
BAE46c	G	V			QTZ 1.1					
BAE46c	G	V			QTZ 1.1					
BAE46c	G	SOL ? V?			QTZ 1.1					
BAE46c	A	LVS	8	CARRE	QTZ 1.2		-72,10	-29,40	154,00	285,70
BAE46c	A	LVS	16	ALLONGE	QTZ 1.2	H20	-68,70	-40,70	214,90	289,00
BAE46c	A	LVS	10	ALLONGE	QTZ 1.2	H20	-67,80	-36,40	240,00	289,80
BAE46c	A	LVS	10	CARRE	QTZ 1.2		-65,20	-34,70	196,70	247,70
BAE46c	A	LVS	10	CARRE	QTZ 1.2		-67,70	-24,00		369,00
BAE46c	A	LVS	10	NOSHAPÉ	QTZ 1.2		-64,50	-36,30	192,60	
BAE46c	A	LVS ?	29	ALLONGE	QTZ 1.2		-67,80	-39,30	208,80	369,00
BAE46c	A	LVS ?	20	ALLONGE	QTZ 1.2		-74,70	-34,10	194,00	
BAE46c	A	LVS		CARRE NOSHAPÉ	QTZ 1.2		-69,70	-26,40	172,00	
BAE46c	A	LVS		RONDE	QTZ 1.2			-25,10	178,00	245,40
BAE46c	B	LVS	9	ALLONGE	QTZ 1.3		-87,7	-28,3	173,3	260
BAE46c	B	LVS	10	ALLONGE	QTZ 1.3		-68,7	-27,4	201,8	
BAE46c	B	LVS	8	CARRE	QTZ 1.3		-73,6	-26,3	189	
BAE46c	B	LVS	10	ALLONGE	QTZ 1.3		-85,6	-31		
BAE46c	B	LVS			QTZ 1.3		-68,2	-29,7	260	
BAE46c	B	LVS			QTZ 1.3		-76,5	-31,6	180,1	
BAE46c	B	LVS			QTZ 1.3		-73,8	-32,3	180,8	
BAE46c	B	LVS?V?			QTZ 1.3		-73,9	-26	194	
BAE46c	B	V			QTZ 1.3					
BAE46c	B	V			QTZ 1.3					
BAE46c	B	LV			QTZ 1.3					
BAE46c	B	LV			QTZ 1.3					
BAE46c	B	SOL			QTZ 1.3					
BAE46c	B	SOL			QTZ 1.3					
BAE46c	B	SOL			QTZ 1.3					
BAE46c	B	SOL			QTZ 1.3					
BAE46c	B	SOL			QTZ 1.3					
BAE46c	B	SOL			QTZ 1.3					
BAE46c	B	SOL			QTZ 1.3					



BAE21b	I	LVS	21	CARRE	CALC 2.1		-83	-37,8	
BAE21b	I	LVS	21	CARRE	CALC 2.1		-79,1	-46	
BAE21b	I	LVS	18	ALLONGE	CALC 2.1		-83,7	-30,8	242,6
BAE21b	I	LVS	17	CARRE	CALC 2.1		-180	-35	270
BAE21b	I	LVS	17	CARRE	CALC 2.1			-42	
BAE21b	I	LVS	17	CARRE	CALC 2.1			-29	
BAE21b	I	LVS	8	CARRE	CALC 2.1				239,6
BAE21b	I	S	18?	RONDE	CALC 2.1			-16,2	
BAE21b	I	LVS	6?	ALLONGE	CALC 2.1		-88	-30,2	
BAE21b	I	V			CALC 2.1				
BAE21b	I	LVS			CALC 2.1				239,9 266,9
BAE21b	I	LVS			CALC 2.1				277,7 284
BAE21b	I	LVS			CALC 2.1				265,4 340
BAE21b	I	LVS			CALC 2.1				235,4 248
BAE21b	Ja	LVS	32	CARRE	CALC 2.1		-87,30	-40,00	
BAE21b	Ja	LVS	20	ALLONGE	CALC 2.1		-89,1	1,34	
BAE21b	Ja	LVS	14	ALLONGE	CALC 2.1		-82,7	-55,6	
BAE21b	Jb	LVS	14	CARRE	CALC 2.1	H2O	-86,4	-55,6	211,1
BAE21b	Jb	LVS	10	ALLONGE	CALC 2.1	H2O	-82,00	-52,00	198,1
BAE21b	Jb	LVS	12	ALLONGE	CALC 2.1		-91,60	-39	200,3
BAE21b	Jb	LVS	7	CARRE	CALC 2.1				
BAE21b	Jb	V			CALC 2.1	H2O			
BAE21b	Jb	V			CALC 2.1	H2O			
BAE21b	Jc	LV	23	CARRE	CALC 2.1	CH4	-64,00	-29,4	177,7
BAE21b	Jc	LVS			CALC 2.1	CH4	-82,5	-51,6	199,7
BAE21b	Jd	LVS	10	RONDE	CALC 2.1	H2O	-86,8	-31	236
BAE21b	Jd	LVS	10	RONDE	CALC 2.1		-78,3/-86	-51,2	185,5
BAE21b	Jd	LVS	10	CARRE	CALC 2.1		-95,9	?	224,4
BAE21b	Jd	LVS	11	CARRE	CALC 2.1		-83	-24,9	
BAE21b	Jd	LVS			CALC 2.1	H2O			
BAE21b	Jd	LVS			CALC 2.1	H2O			
BAE21b	Jd	LVS	11	ALLONGE	CALC 2.1		-83,00	-43,00	
BAE21b	Jd	V			CALC 2.1	CH4			
BAE21b	Jd	V			CALC 2.1	CH4			
BAE21b	Jd	V			CALC 2.1	CH4			
BAE21b	Jd	V			CALC 2.1	CH4			
BAE21b	Je	LV	34	CARRE	CALC 2.1		-65,2	-31,20	
BAE21b	C	LV(s?)			CALC 2.1		-91,70	-24,1	
BAE21b	C	LVS			CALC 2.1				
BAE21b	C	LVS(inc)			CALC 2.1		-90,5	-45,9	207,1
BAE21b	C	LVS			CALC 2.1		-83,7	-14,00	198,7
BAE21b	C	LVS			CALC 2.1		-88,1	-38,60	208,8
BAE21b	C	LVS			CALC 2.1		-83,00	-24,00	214,7
							-77,00		
							-93,60	-27,6	207,9

						-89,60			
						-83,00	-13,60	208,2	
							-21,60		
BAE21b	Ef	LVS		ALLONGE	CALC 2.1	-78,30	-41,00	211,1	
BAE21b	Ef	LVS		ALLONGE	CALC 2.1	-81,20	-48,60		
BAE21b	Ef	LVS		ALLONGE	CALC 2.1	-82,00			
BAE21b	E	LVS		CARRE	CALC 2.1	-66,00	-48,00	212,2	
BAE21b	E	LVS		CARRE	CALC 2.1	-85,00	-53,70		
BAE21b	E	LVS		CARRE	CALC 2.1	-79,2/-89,2	-62,7		
BAE21b	Ee	LVS		NOSHAPE	CALC 2.1	-87,7	-51,2	213,00	
BAE21b	Eb	LVS		CARRE	CALC 2.1	-80,7	-55,5		
BAE21b	Ea	LVS		CARRE	CALC 2.1	-84,4	-52,00		
BAE21b	Ha	sol?			CALC 2.1				
BAE21b	Ed	LVS		CARRE RONDE	CALC 2.1	-85,60	-59,50	216,00	220,00
BAE21b	Ed	LVS		CARRE RONDE	CALC 2.1	-85,00	-37,6?		
BAE21b	Ed	LVS		CARRE	CALC 2.1	-84,6	-57,40		
BAE21b	Ed	LVS		CARRE	CALC 2.1		-32,50		
BAE21b	Fa	LVS		ALLONGE RONDE	CALC 2.2	-85,60	-53,9	238,2	240,00
BAE21b	Fa	LVS		CARRE	CALC 2.2	-83	-47	268,7	273,00
BAE21b	Fa	LVS		ALLONGE RONDE	CALC 2.2	-83,4	-48,2		
BAE21b	Fb	LVS		ALLONGE RONDE	CALC 2.2	-85,00	-37,50	217,8	
BAE21b	Fb	LVS		ALLONGE RONDE	CALC 2.2	-88,50	-41,40		
BAE21b	Ga	LVS	16	CARRE	CALC 2.2		-36,7		
BAE21b	Ga	LVS	16	CARRE	CALC 2.2	-84,00	-39,60		
BAE21b	Ga	LVS	14	CARRE	CALC 2.2	-80,00	-40,00	194,10	
BAE21b	Ga	LVS		CARRE ALLONGE	CALC 2.2	-89,00			
BAE21b	Ga	LVS		TRIANGLE	CALC 2.2	-84,10	-33,90	209,40	289,00
BAE21b	Gc	LVS	9	CARRE	CALC 2.2	-85,80	-55,90	210,00	
BAE21b	Gc	LVS	12	CARRE	CALC 2.2	-70,00	-51,10	208,8	
BAE21b	Gc	LVS	12	CARRE	CALC 2.2		-55,20		
BAE21b	Gc	LVS	17	NOSHAPE	CALC 2.2	-82,5	-48,20	216,7	
BAE21b	Gc	LVS	11	ALLONGE	CALC 2.2	-83,8	-40,8	210,7	
BAE21b	Gc	LVS	10	RONDE	CALC 2.2	-80,00	-50,00	210,00	
BAE21b	Gc	LVS		CARRE RONDE	CALC 2.2		-57,00		
BAE21b	Gc	LVS		CARRE	CALC 2.2	-80,00	-46,70	236,7	
BAE21b	Gb	LVS	12	CARRE	CALC 2.2	-84,80	-51,1	260,7	
BAE21b	Gb	LVS	8	ALLONGE	CALC 2.2	-86,20	-49,00	219,7	
BAE21b	Gb	LVS	8	ALLONGE	CALC 2.2		-52,60		
BAE21b	Gb	LVS	18	RONDE	CALC 2.2	-86,2	-54,1	240,00	

ALLONGE								
BAE21b	Gb	LVS+inc	16?	CARRE	CALC 2.2	-77,00	-62,50	240,00
BAE21b	Gb	LVS+inc	16?	CARRE	CALC 2.2		-47,10	
BAE21b	Gb	LVS			CALC 2.2			
BAE21b	Gb	LVS			CALC 2.2			
BAE21b	Gb	V			CALC 2.2			
BAE21b	G	LVS+inc		CARRE	CALC 2.2			236,50
BAE21b	G	LVS			CALC 2.2			271,80 295,20

**Annexe III.1B : tableau de données moyennes en éléments traces et en métaux des assemblages d'inclusions fluides LVS et LV des poches**

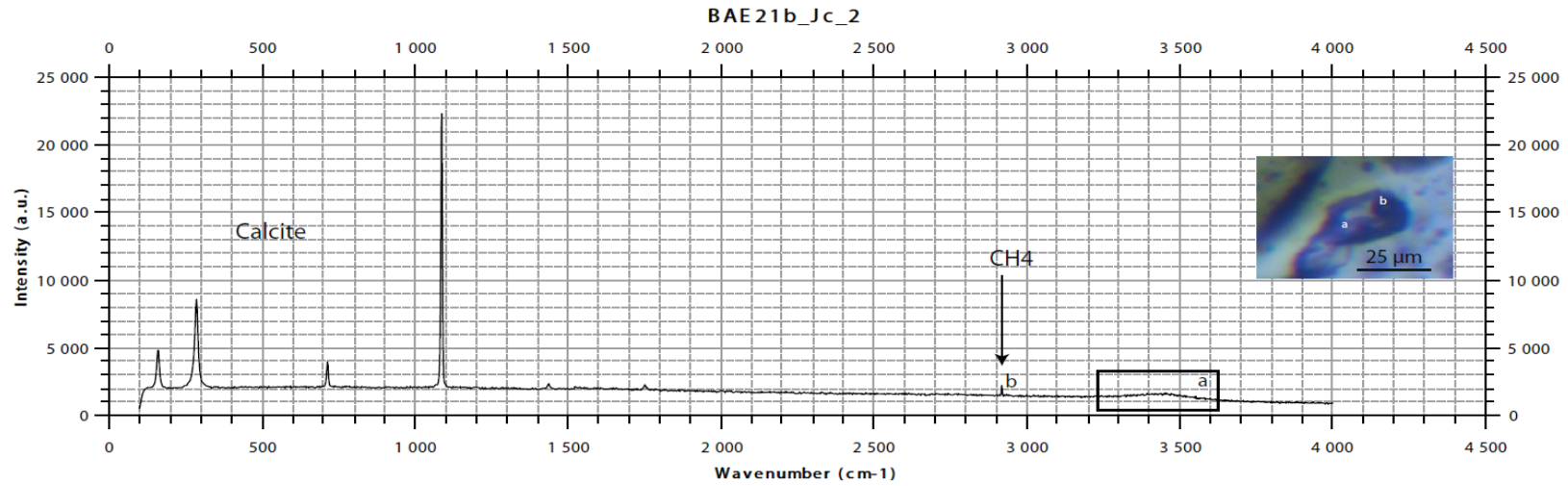
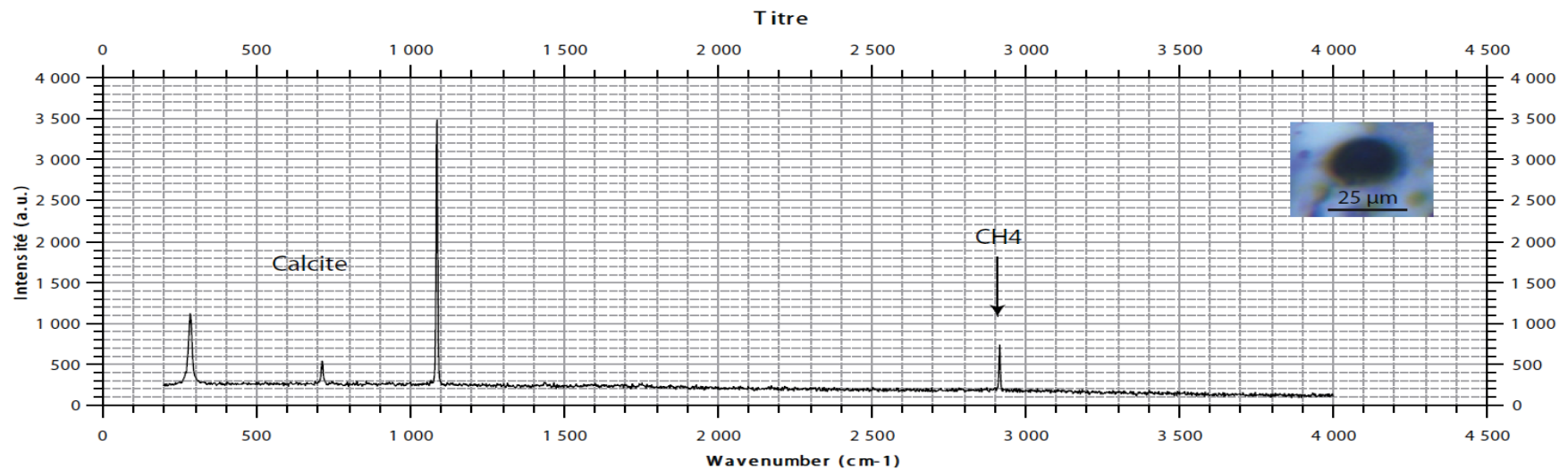
ECH	ZONE	Type IF	TAILLE (µm)	FORME	MINERAL	RAMAN	Te	Tmce	Th	Tmh
BAE59a1	F	LVS	8	ALLONGE	QTZ 2		-82,9	-46,2	157,9	
BAE59a1	F	LVS		CARRE	QTZ 2		-74	-41,3		
BAE59a1	F	LVS		CARRE	QTZ 2		-85,8	-51,3		
BAE59a1	F	LVS		CARRE	QTZ 2		-81,1			
BAE59a1	I	LVS	10	CARRE	QTZ 2		-92,5	-47,8	261,9	
BAE59a1	I	LVS	7	CARRE	QTZ 2		-75	-45	176,6	217,7
BAE59a1	I	LVS			QTZ 2			-47,5	192,8	306
BAE59a1	I	LVS			QTZ 2		-79		185	306
BAE59a1	I	LVS			QTZ 2		-92	-32,6	167	332
BAE59a1	I	LVS			QTZ 2				270	
BAE68f2	D	LVS	7	CARRE	QTZ 2				188,3	
BAE68f2	D	LVS	10	CARRE	QTZ 2		-93,7	-36,7	181,3	
BAE68f2	D	LVS	10	CARRE	QTZ 2		-82,7	-39	173,2	
BAE68f2	D	LV ?	10	RONDE CARRE	QTZ 2			-37,6		
BAE68f2	D	LVS		DIFFERENTE	QTZ 2		-70,8	-24,4		
BAE68f2	D	LVS			QTZ 2				173,8	
BAE68f2	D	LVS			QTZ 2				195,6	
BAE68f2	D	V			QTZ 2				214,3	
BAE68f2	D	LVS			QTZ 2	H2O				
BAE68f2	D	LVS			QTZ 2	H2O				
BAE68f2	D	LVS			QTZ 2					
BAE68f2	H	LVS	24	NOSHAPE ALLONGE	QTZ 2		-81,3	-55,3	184	
BAE68f2	H	LVS	11	RONDE	QTZ 2					
BAE68f2	H	LVS	27	CARRE ALLONGE	QTZ 2		-79,5	-19,8	159,8	
BAE68f2	H	LVS	20	CARRE	QTZ 2		-84,3	-15,2	150	
BAE68f2	H	LVS	22	CARRE ALLONGE	QTZ 2	H2O		-7,2		
BAE68f2	H	LVS	12	ALLONGE	QTZ 2	H2O	-79	-12,8		
BAE68f2	H	LVS ?	22	CARRE	QTZ 2	H2O	-96,7	-13	174,8	
BAE68f2	H	LVS ?	22	CARRE	QTZ 2	H2O		-19		
BAE68f2	H	V	37	NOSHAPE ALLONGE	QTZ 2					
BAE68f2	H	LV ? Sol ?	20+	NOSHAPE CARRE	QTZ 2					
BAE68f2	H	LVS	9	CARRE	QTZ 2					

BAE68f2	H	LV?	27	ALLONGE	QTZ 2	-71,6	-17,2		
BAE68f2	H	LV			QTZ 2				
BAE68f2	H	V			QTZ 2				
BAE68f2	H	LV			QTZ 2				
BAE68f2	H	LV			QTZ 2				
BAE68f2	H	V			QTZ 2				
BAE68f2	Hbis	V			QTZ 2				
BAE68f2	Hbis	SOL			QTZ 2				
BAE68f2	K	V			QTZ 2				
BAE68f2	K	LVS			QTZ 2				
BAE68f2	K	V			QTZ 2				
BAE59a1	J	LVS		ALLONGE	CALC 4.1	-77,3	-53,6	164	
BAE59a1	J	LVS		ALLONGE	CALC 4.1		-57		
BAE59a1	J	LVS		CARRE	CALC 4.1		-25,6		
BAE59a1	J	LVS		CARRE	CALC 4.1	-74	-33,7	189	250
BAE59a1	J	LVS		ALLONGE	CALC 4.1	-80,6	-35,6	208,7	
BAE59a1	J	LVS		ALLONGE	CALC 4.1		-52,7		
BAE59a1	J	LVS		CARRE RONDE	CALC 4.1	-85,3	-53,5	211,4	229,3
BAE59a1	JBIS	LVS		ALLONGE	CALC 4.1				254
BAE59a1	JBIS	LVS			CALC 4.1				265,4
BAE59a1	K	LVS		RONDE	CALC 4.1	-77,8	-19	143	
BAE59a1	K	LVS		RONDE	CALC 4.1		-17,4	200,2	330,2
BAE59a1	K	LVS		CARRE	CALC 4.1	-82	-28,1		
BAE68f2	L	LVS			CALC 4.1	-96,8	-40,9	221,7	233,7
BAE68f2	L	LVS			CALC 4.1	-89,3	-28,3	199,5	
BAE68f2	L	LVS			CALC 4.1	-85,9		218,5	
BAE68f2	M	LVS			CALC 4.1	-84,3	-31,9		
BAE68f2	M	LVS			CALC 4.1	-58,4			
BAE68f2	M	LVS			CALC 4.1			276,7	345,7
BAE68f2	Dbis	LVS			CALC 4.1				
BAE59a1	L	LVS		CARRE	CALC 4.2	-83	-27	181,7	224,9
BAE59a1	L	LVS		CARRE	CALC 4.2			202,7	
BAE59a1	L	LV		NOSHAPE	CALC 4.2	-74,3	-36,3	188,7	
BAE59a1	L	LVS		CARRE	CALC 4.2	-74,3	-24	179,6	223,6
BAE59a1	L	LVS		CARRE	CALC 4.2	-88,2	-27,1	194,6	215,6
BAE59a1	L	LVS		CARRE	CALC 4.2	-85,7	-27,1	194,6	215,6
BAE59a1	L	LVS		RONDE ALLONGE	CALC 4.2				
BAE59a1	L	LVS		CARRE	CALC 4.2	-87	-30		211,7
BAE59a1	L	LVS			CALC 4.2	-79,8		258,4	215,8
BAE59a1	Ebis	V			CALC 4.2				
BAE59a1	Ebis	V			CALC 4.2				
BAE59a1	Ebis	sol			CALC 4.2				

Annexe III.1C : tableau de données moyennes en éléments traces et en métaux des assemblages d'inclusions fluides LVS et LV des veines

ECH	ZONE	Type IF	TAILLE (µm)	FORME	MINERAL	RAMAN	Te	Tmice	Th	Tmh
BAE70a	A	LVS	40	ALLONGE	QTZ 2		-70,9			
BAE70a	A	LVS	10	CARRE	QTZ 2		-88,1		267	231,4
BAE70a	A	LVS	10	CARRE	QTZ 2				180	
BAE70a	A	LVS	14	CARRE	QTZ 2		-85,7	-19,9	241,2	238,4
BAE70a	A	LVS	14	CARRE	QTZ 2				178,7	
BAE70a	A	LVS	10	RONDE ALLONGE	QTZ 2		-77,2	-5,3	181,2	
BAE70a	A	LVS	19	CARRE	QTZ 2		-97	-30	231	238,4
BAE70a	A	LVS	19	CARRE	QTZ 2				150	
BAE70a	A	LVS	22	ALLONGE	QTZ 2		-76,3	-46,3	254	273,5
BAE70a	A	LVS	20	NOSHAPE	QTZ 2		-90,2	-21,8	176,2	
BAE70a	A	LVS			QTZ 2			6,2		
BAE70a	A	LVS			QTZ 2				218,5	
BAE70a	A	LVS			QTZ 2				165,8	240,4
BAE70a	A	LVS			QTZ 2				211,9	315,7
BAE70a	A	LVS			QTZ 2				260,4	298,8
BAE70a	A	LVS			QTZ 2				261,2	315,4
BAE70a	C	V			QTZ 2					
BAE70a	C	LVS	12	RONDE	QTZ 2		-98,5		173,6	
BAE70a	C	LVS	15	ALLONGE RONDE	QTZ 2			-21	167,5	
BAE70a	C	LV ? LVS ?	20	ALLONGE	QTZ 2		-71,7		172,4	
BAE70a	C	LVS	15	ALLONGE	QTZ 2	H2O	-87,7	-44	162	
BAE70a	C	LVS			QTZ 2	H2O		-22,1	197,2	
BAE70a	C	LVS			QTZ 2				185	
BAE70a	C	LVS			QTZ 2				173,9	
BAE70a	C	V			QTZ 2					
BAE70a	C	V			QTZ 2					
BA51c	G	LVS		ALLONGE	QTZ 2		-87,7	-23,3	140,4	
BA51c	G	LV? S		RONDE CARRE	QTZ 2			-23		
BA51c	G	LV? S		ALONGE	QTZ 2		-90,13	-22,37	143,6	
BA51c	G	LVS		NOSHAPE	QTZ 2			-20,1	119,6	
BA51c	G	LVS? + inc?		CARRE	QTZ 2			-29,9	128,4	
BA51c	G	LVS			QTZ 2		-85,7	-19		
BA51c	E	V			QTZ 2					
BA51c	E	V			QTZ 2					
BA51c	E	V			QTZ 2					
BA51c	E	LVS			QTZ 2					
BAE3	A	LV			CALC 4.2		-82,6	-35,9		
BAE3	A	LVS			CALC 4.2		-87,6	-32,2	214,8	225,1
BAE3	B	LVS			CALC 4.2		-63,8	-36,3	209,7	228,7
BAE3	B	LVS			CALC 4.2		-66	-36,4	208,7	227,4
BAE3	A	LVS			CALC 4.2		-84,7	-45,8	216,5	234,5
BAE3	A	LVS			CALC 4.2			-22,4		

BAE3	A	LVS			CALC 4.2	-77,4		247,4
BAE3	A	LVS			CALC 4.2	-83,4	-48,9	251,8 208,4
BAE3	A	LVS			CALC 4.2	-77,6	-23,8	218,3
BAE3	A	LVS			CALC 4.2		-32,1	
BAE3	B	LVS			CALC 4.2	-74,4	-46,7	192,7 219,7
BAE3	B	LVS			CALC 4.2			
BAE3	B	LVS			CALC 4.2	-71,3	-37,1	
BAE3	B	LVS			CALC 4.2	-79,5	-29	
BAE3	B	LVS			CALC 4.2		-43,5	
BAE3	A	LVS			CALC 4.2		-3,2	
BAE3	A	LVS			CALC 4.2	-82,1	-29,4	249,4
BA51C	C	SOL			CALC 5			
BA51C	C	SOL			CALC 5			
BA51C	D	SOL			CALC 5			
BA51C	D	SOL			CALC 5			
BA51c	F	LV ?	12	ALLONGE NOSHAPE	QTZ 3	-67,8	-22,9	115,8
BA51c	F	LV ?	12	ALLONGE NOSHAPE	QTZ 3	-53		
BA51c	F	LV ? LVS ?	9	ALLONGE	QTZ 3	-77,3	2,4	132,6
BA51c	F	LV ? LVS ?	10	CARRE	QTZ 3	-77,3	5,6	125,8
BA51c	F	LV ? LVS ?	10	CARRE	QTZ 3	-48,5		
BA51c	F	LVS			QTZ 3	-74,3	-24,1	
BA51c	F	LVS			QTZ 3	-74,3	-22,2	140
BA51c	F	LVS			QTZ 3	-71,5	-21,5	127,2

Annexe III.2A : Spectre Raman a) du liquide composé d'eau et b) de la phase vapeur de CH<sub>4</sub> d'une inclusion triphaséeAnnexe III.2B : Spectre Raman de la phase vapeur de CH<sub>4</sub> d'une inclusion monphasée en vapeur

Annexe III.3A : tableau de données moyennes en éléments traces et en métaux des assemblages d'inclusions fluides LVS et LV des minéralisations massives

Type de minéralisations	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives
ECH	BAE21b	BAE21b	BAE21b	BAE21b	BAE21b	BAE21b	BAE21b	BAE21b	BAE21b	BAE21b
ZONE	Ja	Ja	Ja	Jd	Jd	Jd	Jd	Jd	Jd	Jd
Type IF	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS
taille (µm)	32	20	14	10						
forme	CARRE	ALLONGE	ALLONGE	RONDE						
MINERAL	Calc 2.1	Calc 2.1	Calc 2.1	Calc 2.1	Calc 2.1	Calc 2.1	Calc 2.1	Calc 2.1	Calc 2.1	Calc 2.1
Li	402	3138	738	188	189	3816	2508	1116	1831	251
B	383	134	1810	58	391	1278	125	1447	365	20
Na	105027	72432	95458	109079	101372	38279	68157	96106	75095	104821
Mg	8662	9931	19327	411		42171	6431	13598	2069	481
Si		217919	138243		108650	472137		60675	24905	31321
S		89830		608			1919	645	8196	
Cl	178711	674340	205033	171702	156384	701075	499501	181898	448111	146854
K	15340	102254	40856	4537	25085	193319	113653	39128	95151	15889
Ca										
Mo		150640		9062		382531		121880	6982	
Fe	7405	110973	53701	32278			21849		2308	
Co				2	57	51	5	39		
Ni	242	283	155	10	1073	682	28		2	15
Cu	24	266	10	11	651		1	123	13	
Zn	118	6818	115		714		2430	884	1283	
As			22	39	3654	1173	69	102	3	40
Br	9438	38397	15319	5609	3123	67085	37431	12434	25230	6549
Rb	107	1371	15	20	186	1026	664	98	466	39
Sr	8339	68564	22159	5160			95929	17165	26168	8565
Mo		652			110	651	51	1211		
Ag			61	11	9166		1			12
Cs	77	604	196	14	39	1199	507	230	416	73
Ba	2438	1272	10040	864	9061	12221	26929	7474	9481	3252
Tl		63	7		27	79	33		29	
Pb	33	2137	703	13	960	429	1072	205	356	18

Type de minéralisations	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives
ECH	BAE21b	BAE21b	BAE21b	BAE21b	BAE21b	BAE21b	BAE21b	BAE21b	BAE21b	BAE21b
ZONE	Jd	Jd	Jd	Jd	Jd	Jd	Jd	Jd	Ga	Ga
Type IF	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS
taille (µm)									14	
forme									CARRE	CARRE ALLONGE
MINERAL	Calc 2.1	Calc 2.1	Calc 2.1	Calc 2.1	Calc 2.1	Calc 2.1	Calc 2.1	Calc 2.1	Calc 2.2	Calc 2.2
Li	1012	801	1259	660	536	998	704	1196	3910	503
B	740	384		97	17		86	555	978	151
Na	82685	96311	87274	99253	99547	92331	99632	76791	54148	102495
Mg			7888			4181	3798	7467	4534	
Si				84971	105810	11094	31292			
S	57880	2571	13735				25627	16908	9201	3724
Cl	409234	255092	324172	152211	163784	254881	185671	459106	407319	129067
K	74914	38582	62676	30736	29953	49194	29725	90630	151004	22091
Ca										
Mo	2064	11593								712



Fe	131793	5880		43436		10746	6235		4200	
Co	36			54	69			19	20	1
Ni	66			1258	512	43				4
Cu				311	150	17		64		12
Zn	2825	1679		655	183	841	575	14	9762	1557
As	146			1443		57			38	
Br	19134	17190		5307	8097	14445	6834	24317	41678	5322
Rb	300	368	258	175	241	450	201	808	688	126
Sr	29833	9211	20256			35790	10316	10486	47527	5207
Mo		482	1180		185	84			147	10
Ag		60		218			45	57		3
Cs	300	101	209	105	96	210	92	472	499	88
Ba	18211	5910	15644	7311	3206	10890	7391	11707	26896	3565
Tl	9	19			2	23	27	32	39	9
Pb	558	71	281	363	230	400	312		2367	625

Type de minéralisations	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives
ECH	BAE21b	BAE21b	BAE21b	BAE21b_GD_8	BAE21b_GD	AE21b_GD_x8	AE21b_GD_x11	AE21b_GD_x12	
ZONE	Ga	Ga	Ga						
Type IF	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	
taille (µm)									
forme									
MINERAL	Calc 2.2	Calc 2.2	Calc 2.2	Calc 2.2	Calc 2.2	Calc 2.2	Calc 2.2	Calc 2.2	Calc 2.2
Li	1467	144	2252	658	772	915	1574	1761	
B		80	966					273	
Na	88339	108597	72619	100040	99126	107131	91782	83282	
Mg			3311			262406	3711		
Si			58621	15651	49573	119789			
S		6291		6296	6936				
Cl	305955	87696	304870	164879	177824	118991	324789	389508	
K	59838	5822	101755	28639	31076	9729	50657	73322	
Ca									
Mo	53482		21608				27406		
Fe		8012	1277			156678	105372	9064	
Co	9	1	13			9	5		
Ni		39		23		235			
Cu			84			36	14		
Zn	2548	263	8201	157	1320	558	591	2909	
As	43		53				102		
Br	16561	1390	16622	7208	7515	1935	10228	22124	
Rb	243	26	475	273	194	60	354	450	
Sr	27232		35533	14679	9799	2849	19696	37651	
Mo			34	1	73	127	325	172	
Ag	1		42	66					
Cs	321	18	340	121	127	87	339	509	
Ba	14326	529	18122	8557	6894	5325	15737	14502	
Tl	22	4	32	3	18	6	50	8	
Pb	401	236	232	309	446	44	67	377	

Type de minéralisations	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives
ECH	AE21b_GD_x12	BAE21b_GD_8	BAE21b_GD_8	BAE21b_GD	BAE21b_GD	BAE21b_GD	BAE21b_GD	BAE21b_GD
ZONE								
Type IF	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS

taille (µm)								
forme								
MINERAL	Calc 2.2	Calc 2.2	Calc 2.2	Calc 2.2	Calc 2.2	Calc 2.2	Calc 2.2	Calc 2.2
Li	2390	1381	686	1223		281		1819
B	4796	410		255	1841		94	256
Na	85434	92383	96327	94003	110780	109810	110780	85956
Mg	26754	7699	31244			1411		7330
Si	729319				590051			19957
S			136363	2475				
Cl	439285	295275	213747	318016	177863	104208	12340	333287
K	67583	49054	38539	44734		2586		66191
Ca								
Mo	129165	15433	188682			418	4502	
Fe	43360	20506	368946			593	9184	
Co		6	27			7		74
Ni		6	112	70	225			148
Cu	377	9			1146	12	4	19
Zn		1837	4135			149		2531
As		59	1200			29		962
Br	19263	14114	4428	12041		2659		12446
Rb	179	312	47	224		19		523
Sr	24448	23449	27034	10032		3366		29503
Mo		7	586		1370			
Ag		3	231			4		8
Cs	67	242	145	346		23		357
Ba	9877	14919	10433	6762		14601		9737
Tl	36	28		17		1		33
Pb	802	541	451	7		76		733

Type de minéralisations	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives
ECH	AE21b_GD_x	AE21b_GD_x	BAE21b	BAE21b	BAE21b	BAE21b	BAE21b	BAE21b	BAE46c
ZONE			Fb	Fb	Fb	Fb	Fb	Fb	G
Type IF	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS
taille (µm)									
forme									
MINERAL	Calc 2.2	Calc 2.2	Calc 2.2	Calc 2.2	Calc 2.2	Calc 2.2	Calc 2.2	Calc 2.2	Qtz 1.1
Li	564	1253	457	1258	871		2186	409	
B		965	1161	241	481	1788	116	29	614
Na	103711	96324	90235	77933	82808	86173	61660	89985	106121
Mg		22121		27516	14151	51253	58175	3939	558
Si		30835			5377	93038	247399		
S	1569	2569				7630		559	2200
Cl	163353	196683	115089	249353	173108	51458	388358	124400	85489
K	18848	38545	19326	52129	39132	30157	95520	19992	20290
Ca									12210
Mo	9587	9072		5836	4781	4058	78758	8591	1590
Fe	7560	23538		22239				974	544
Co		42				106			5
Ni		18							157
Cu	20		288	78	37	526			134
Zn	1101	2200	5792	1701	2601	677	1445	1138	462
As									187
Br	5557	8031		15270	8413		22856	2875	2068
Rb	145	194		166	188		550	127	220

<b>Sr</b>	8235	13048	4697	27085	14572		46471	6883	3122
<b>Mo</b>		247	340				629		
<b>Ag</b>	5	160	146			26		12	40
<b>Cs</b>	90	186	7	238	133		419	77	111
<b>Ba</b>	6392	9171	3883	14305	7983	192	19127	4246	2995
<b>Tl</b>	8	13			12	5	48	4	
<b>Pb</b>	204	664	458	148	557	68		416	141

Type de minéralisations	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives
<b>ECH</b>	BAE46c	BAE46c	BAE46c	BAE46c	BAE46c	BAE46c	BAE46c	BAE46c	BAE46c	BAE46c
<b>ZONE</b>	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G"
<b>Type IF</b>	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS
<b>taille (µm)</b>										
<b>forme</b>										
<b>MINERAL</b>	Qtz 1.1	Qtz 1.1	Qtz 1.1	Qtz 1.1	Qtz 1.1	Qtz 1.1	Qtz 1.1	Qtz 1.1	Qtz 1.1	Qtz 1.1
<b>Li</b>		1032	48			122	336			
<b>B</b>	494	1425	196	1916	990	173	1782	261	32	
<b>Na</b>	96205	113730	112565	107949	103160	108809	111256	106895	92639	111219
<b>Mg</b>	5567		1782			1038		3049	14794	
<b>Si</b>										
<b>S</b>			2418	11663						
<b>Cl</b>	107295		107129	301100	67060	86478	102261	195668	46261	84236
<b>K</b>	46730		3108	15415	28186	13123	6599	18227	56240	6697
<b>Ca</b>	46271		65650	142564	335473	407		156092		3645
<b>Mo</b>	3416			1698	1946	2378	4859	1534	2735	1029
<b>Fe</b>	23066		658	2463		5866	1749	4294	20091	4160
<b>Co</b>	39		2			0	91	3	22	16
<b>Ni</b>		16				2				86
<b>Cu</b>		89	7	118	597	20	523	293		43
<b>Zn</b>	2021		838	9284	1952	1802	4370	3483	827	168
<b>As</b>		1775	8	90		290				
<b>Br</b>			583	14719	1466		7252	10618	1249	2006
<b>Rb</b>	475		8	230	194	51			420	56
<b>Sr</b>	4761		2611	6707	4683	2960	4829	8036	800	1693
<b>Mo</b>	6				59			33	3	8
<b>Ag</b>	173					36			117	
<b>Cs</b>	104		42	261	248	59	84	78	90	69
<b>Ba</b>	2868		944	4557	5292	2291	3559	2506	1214	1260
<b>Tl</b>	48		5	22	4		25	27	3	5
<b>Pb</b>	184		93	688	705	272	245	276	394	65

Type de minéralisations	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives
<b>ECH</b>	BAE46c	BAE46c	BAE46c	BAE46c	BAE46c	BAE46c	BAE46c	BAE46c	BAE46c	BAE46c
<b>ZONE</b>	G	A	A	A	A	A	A	A	A	B
<b>Type IF</b>	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS
<b>taille (µm)</b>		8	16	10	10	10	10			9
<b>forme</b>		CARRE	ALLONGE	ALLONGE	CARRE	CARRE	NOSHAPE	CARRE NOSHAPE	RONDE	ALLONGE
<b>MINERAL</b>	Qtz 1.1	Qtz 1.2	Qtz 1.2	Qtz 1.2	Qtz 1.2	Qtz 1.2	Qtz 1.2	Qtz 1.2	Qtz 1.2	Qtz 1.3
<b>Li</b>	310	177	294	22	70		307	270	780	69
<b>B</b>	958	254	373	2419	1184	1118		278		
<b>Na</b>	113730	92729	98185	66495	100374	95150	107880	103530	102939	98363
<b>Mg</b>				110		3191	416	17270		

Si										
S							3757			
Cl	121979	133108	120025	280302	112987	121598	54060	57525	79186	135191
K		44669	30121	114622	24286	38214	4272	15869	17446	41187
Ca	7719	72286	65056	468062	76169	16803	15650	11660		90854
Mo	1075	5114	619		1325	3358	1591	3075	2007	
Fe		4956					2407	31001		424
Co	8		5				40	23	15	6
Ni	44	2					27	175		0
Cu	64		113					342		15
Zn	5725	1377	287	576	1213	250	1183	463	766	481
As	24				620	376		632	5	
Br	2427	10023	6774	1151	1737	2012		759	2995	3710
Rb		210	124	1020	100	244	34	45	187	153
Sr	3896	8400	2794	24861	4408	7265	1355	1543	3108	5175
Mo			5	1121	184	251	1659	220	16	12
Ag		89	4				83		85	
Cs	56	166	98	612	120	112	13	36		147
Ba	385	6469	3089	18217	3823	4820	80	1279	2306	4479
Tl	2	19	7				5	8	8	27
Pb	58	159	239		586		90	373	160	56

Type de minéralisations	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives
ECH	BAE46c	BAE46c	BAE46c	BAE46c	BAE46c	BAE46c	BAE46c
ZONE	B	B	B	B	B	B	B
Type IF	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS
taille (µm)	10	8					
forme	ALLONGE	CARRE					
MINERAL	Qtz 1.3	Qtz 1.3	Qtz 1.3	Qtz 1.3	Qtz 1.3	Qtz 1.3	Qtz 1.3
Li	112			319		262	
B			288	1429	5	1458	
Na	92986	107614	108816	103557	110988	95437	106024
Mg		91	737	3945	229	1549	1278
Si							
S	10880					18226	4790
Cl	232478	109676	84715	109317	123287	71619	72117
K	55524	16519	13315	27335	7524	48988	20758
Ca	128638	71804	3777				209091
Mo		1513	5627	8248	5524	8153	8863
Fe				13137	5777	14165	4166
Co				55		19	22
Ni	36				15	17	164
Cu	50	35	88	312	47	472	45
Zn	1576						1145
As					294		
Br	10753	1858	3418		264	9967	
Rb	210	127	101	123	44	447	48
Sr	5875	5511	5634	8646	2769	9728	9393
Mo		108	46	73	244		
Ag	73		8	538	48	9	
Cs	376	73	91	149	60	270	73
Ba	5730	3941	4623	684	2863	8415	10872
Tl	65	6	15		6		41
Pb	213	476	317	1377	166	438	412

**Annexe III.3B : tableau de données moyennes en éléments traces et en métaux des assemblages d'inclusions fluides LVS et LV des poches**

Type de minéralisations	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE
<b>ECH</b>	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1
<b>ZONE</b>	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
<b>Type IF</b>	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS
<b>taille (µm)</b>										10	7
<b>forme</b>										CARRE	CARRE
<b>MINERAL</b>	Qtz2	Qtz2	Qtz2	Qtz2	Qtz2	Qtz2	Qtz2	Qtz2	Qtz2	Qtz2	Qtz2
<b>Li</b>	13168			4777	4302	8883	75				
<b>B</b>	1765	199	725	92	100	113			680	709	784
<b>Na</b>	80361	127618	98094	128100	130958	131463	114551	119530	123386	124770	116230
<b>Mg</b>	160	101		245567		54298			687		
<b>Si</b>											
<b>S</b>			14322		4843					10945	29955
<b>Cl</b>	666992	129510	757245	112654	136566	43667	323787	155088	110610	262812	184504
<b>K</b>	139432	13424	92149	12140	4518	3171	48267	34991	24708	21019	43791
<b>Ca</b>	2279049	122638	1337653		178763		217628	396589	71175		214542
<b>Mo</b>	882	58	171	14039		4178	2573	15544	9184	11922	16475
<b>Fe</b>		646	2721	312998		109231	23008		951	2184	1603
<b>Co</b>			5	299	90	124		10	5		21
<b>Ni</b>	118			2701	400	3206		22	55		60
<b>Cu</b>	8		72	661	156	328	346		46	121	114
<b>Zn</b>	1001	72		5559		1135	3231	3339	2134	10099	6780
<b>As</b>		5	1096	3089	12	7046	260				
<b>Br</b>	43449	5832	52702	10035		1059	26229		4490	1068	11167
<b>Rb</b>	796	88	545	57	87	21	224	306	171	33	209
<b>Sr</b>	102338	7114	59441	4475	3110		15870	8866	4856	4193	3527
<b>Mo</b>	64		183	2306	393	649		36	3	414	292
<b>Ag</b>	59			170	2	104	227		59	140	
<b>Cs</b>	883	94	773			21	206	93	39	206	197
<b>Ba</b>	40811	8311	9839	993	1547	585	15123	14741	6224	11138	5078
<b>Tl</b>	68	4	28				85	18	5		31
<b>Pb</b>	605	179	86	185	106	117	270	1143	386	947	1059

Type de minéralisations	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE
<b>ECH</b>	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1
<b>ZONE</b>	L	L	L	L	L	L	L	L	L	J	L
<b>Type IF</b>	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS
<b>taille (µm)</b>											
<b>forme</b>									NOSHAPE	ALLONGE	CARRE
<b>MINERAL</b>	Calc 4.2	Calc 4.2	Calc 4.2	Calc 4.2	Calc 4.2	Calc 4.2	Calc 4.2	Calc 4.2	Calc 4.2	Calc 4.2	Calc 4.2
<b>Li</b>	241	2618	1375	495	1332	578	630	960	500	360	2479
<b>B</b>		12		324	1885	86	320	770	271	177	1444
<b>Na</b>	80652	40973	52031	74262	78785	73985	73883	65985	71003	88186	44238
<b>Mg</b>	249	3260			5922			295	2952	29	
<b>Si</b>	6055	16309		25097		14081	497	94858			13124
<b>S</b>				6537	955				4913		1932

Cl	71324	492417	238021	140019	810904	143443	116060	190309	161531	91463	346931
K	11208	117010	87522	28246	16187	28985	29256	50316	36937	16084	108302
Ca											
Mo	14580	18754	21787	11945			9284				33593
Fe	633	7221			7794		295			1541	6479
Co			7		17	21			14	2	36
Ni	28			113	156	11	6				156
Cu	28			38	190	32	17				73
Zn	1367	12356	5857	1713	15320	478	2290	5930	2611	1321	10577
As					162	36	5		30	21	2167
Br	1729	31817	16917	5177	27647	5742	3471	8198	6593	3687	17491
Rb	66	711	708	180	184	173	182	245	427	94	691
Sr	2223	24847	16680	8077	66750	8083	6070	12591	8705	4306	22150
Mo		274			41	34	5	374		14	58
Ag		157	129		12		4				6
Cs	52	566	459	137	351	128	124	255	148	62	497
Ba	3809	20846	17171	8102	46125	8436	7759	9368	11114	4489	30584
Tl	6	103	0	11	37	14	9	13	6	8	36
Pb	282	1923	920	622	4651	371	632	899	780	302	2142

Type de minéralisations	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE
ECH	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1
ZONE	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	J
Type IF	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS
taille (µm)											
forme	CARRE	CARRE	CARRE	CARRE							CARRE
MINERAL	Calc 4.2	Calc 4.2	Calc 4.2	Calc 4.2	Calc 4.2	Calc 4.2	Calc 4.2	Calc 4.2	Calc 4.2	Calc 4.2	Calc 4.2
Li	285	776	37	547	1957	1491	433	690	1160	1523	687
B	270	70	83	229	1064	900	199	185	230		263
Na	76247	60726	83255	74271	45826	54682	74512	64958	63008	44910	78774
Mg	344	1519	137	286	4734	2092	1068	2058			
Si				792					2026		9583
S	1703		704		6277	2008					
Cl	96878	248092	57878	120233	333290	256345	119088	182180	202967	163506	146560
K	22953	64340	4267	28222	104068	80455	27580	53054	58255	106510	41180
Ca											
Mo	1441		2049	6187		41605	16737		19213	38439	
Fe		26879	1471	1057		4945			1934	7586	4668
Co	4	6	1	0	2	4			1		2
Ni							31			1268	10
Cu	107	30	0	11		55	58		12	82	9
Zn	2309	7102	360	2201	11414	8337	1984	5255	4298	6088	5758
As	138		2			56	15		25	100	360
Br	3574	9977	518	4148	15780	12258	3298	8108	8987	11235	5540
Rb	136	317	25	168	599	432	197	266	340	453	231
Sr	5775	16892	1066	6605	23048	16187	6101	7323	13082	11736	7333
Mo	45					6	36		11		350
Ag				5	16						
Cs	89	192	18	121	451	315	107	167	271	274	114

<b>Ba</b>	5794	18103	1100	8363	27807	23824	7756	12808	12817	15721	9041
<b>Tl</b>	19	14	2	11	56	18	15	12	26	23	3
<b>Pb</b>	523	1271	85	627	2051	1752	650	733	1188	1580	737

<b>Type de minéralisations</b>	POCHE	POCHE	POCHE
<b>ECH</b>	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1
<b>ZONE</b>	J	J	JBIS
<b>Type IF</b>	LVS	LVS	LVS
<b>taille (µm)</b>			
<b>forme</b>	ALLONGE	CARRE RONDE	ALLONGE
<b>MINERAL</b>	Calc 4.2	Calc 4.2	Calc 4.2
<b>Li</b>	363		1479
<b>B</b>	117		408
<b>Na</b>	86073	94218	62209
<b>Mg</b>	238		451
<b>Si</b>	241	159755	
<b>S</b>	3469	32469	
<b>Cl</b>	100532	16566	212930
<b>K</b>	21719		85350
<b>Ca</b>			
<b>Mo</b>		86763	
<b>Fe</b>	2636		13396
<b>Co</b>	3		
<b>Ni</b>	19	100	
<b>Cu</b>	20		
<b>Zn</b>	1289	71	7529
<b>As</b>	14		
<b>Br</b>	3005		16451
<b>Rb</b>	152		396
<b>Sr</b>	4338		8944
<b>Mo</b>	2		79
<b>Ag</b>	4	125	
<b>Cs</b>	92		403
<b>Ba</b>	3933		8680
<b>Tl</b>	9	2	14
<b>Pb</b>	275	1490	663

**Annexe III.3C : tableau de données moyennes en éléments traces et en métaux des assemblages d'inclusions fluides LVS des veines**

<b>Type de minéralisations</b>	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES
<b>ECH</b>	BAE70a	BAE70a	BAE70a	BAE70a	BAE70a	BAE70a	BAE70a	BAE70a	BAE70a
<b>ZONE</b>	A	A	A	A	A	A	A	A	A
<b>Type IF</b>	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS
<b>taille (µm)</b>	40	10	10	14	14	10	19	19	22
<b>forme</b>	ALLONGE	CARRE	CARRE	CARRE	CARRE	RONDE ALLONGE	CARRE	CARRE	ALLONGE
<b>MINERAL</b>	QTZ 2	QTZ 2	QTZ 2	QTZ 2	QTZ 2	QTZ 2	QTZ 2	QTZ 2	QTZ 2
<b>Li</b>	273	296	2076	388	173			528	125

<b>B</b>	322	212		66	267	1432		294	1639
<b>Na</b>	91121	92238	90184	91162	87937	63551	63651	90569	84845
<b>Mg</b>	169	18			62	402		110	
<b>Si</b>									
<b>S</b>		7221	8334			2357	99023		
<b>Cl</b>	26424	23393	43951	48890	81493	190016	346086	42424	159546
<b>K</b>	7839	4860	10336	7728	16328	81352	81086	9312	24573
<b>Ca</b>	167908	83135	182975	160790	240131	657034	1706151	215599	153220
<b>Mo</b>	7980	5476	5355	5182	5961	35961		12116	600
<b>Fe</b>	762	94	3632	603	251	1246		2799	
<b>Co</b>	7				1		20	7	
<b>Ni</b>				11	8				104
<b>Cu</b>		33		39	63	43		26	
<b>Zn</b>	2191	836	1469	2957	4968	13868	19200	4519	9237
<b>As</b>	56		38	26	3	103			238
<b>Br</b>		515	1128	963	2032	4844	32597	818	7250
<b>Rb</b>	197	97	136	142	192	801	1040	228	232
<b>Sr</b>	3731	2046	4751	3662	5927	22877	31163	8239	8836
<b>Mo</b>	45				24		2371	47	
<b>Ag</b>						52			45
<b>Cs</b>	146	79	168	126	210	790	816	158	172
<b>Ba</b>	7384	6332	9540	3735	3430	25058	4684	11801	7898
<b>Tl</b>	8	8	26	11	11	43	112	15	36
<b>Pb</b>	621	480	985	678	1007	1754	2949	945	1120

Type de minéralisations	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES
<b>ECH</b>	BAE70a	BAE70a	BAE70a	BAE70a	BAE70a	BAE70a	BAE70a	BAE70a	BAE70a
<b>ZONE</b>	A	A	x	x	x	x	x	C	C
<b>Type IF</b>	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS
<b>taille (µm)</b>	20								12
<b>forme</b>	NOSHAPE								RONDE
<b>MINERAL</b>	QTZ 2	QTZ 2	QTZ 2	QTZ 2	QTZ 2	QTZ 2	QTZ 2	QTZ 2	QTZ 2
<b>Li</b>	84	97	492	287			46		79
<b>B</b>	340	235	900	707		100	144	1568	926
<b>Na</b>	88212	83830	77450	47502	87880	89702	93671	77455	85306
<b>Mg</b>	73		419	270		7606	5754	7276	3703
<b>Si</b>									
<b>S</b>	247		7367	6518				21597	5145
<b>Cl</b>	65207	117107	174915	589557	39549	48814	51259	199589	122835
<b>K</b>	15595	27280	44292	124146	16482	11622	11320	54557	33624
<b>Ca</b>	157872	251151	536128	955462	212815	40923	91667	871194	543504
<b>Mo</b>	7069	9687	7202	15706	7957	3829	2493	14118	12765
<b>Fe</b>	1366			2989	299	27329	4336	9908	
<b>Co</b>	3				11	3	2		5
<b>Ni</b>	1			86	201		38	1	
<b>Cu</b>	19	75	12	71		15	47	403	45
<b>Zn</b>	2077	5630	3581	22154	2307	1383	1335	24006	7063
<b>As</b>				178			13	267	70
<b>Br</b>	1155	5459	11446	32581	327	930	793	15252	7554
<b>Rb</b>	157	292	371	1101	172	84	92	981	432
<b>Sr</b>	4028	4788	9403	29632	5288	1960	2688	21010	11174
<b>Mo</b>	17		290	5		8			
<b>Ag</b>	15	24		1		3	6		32
<b>Cs</b>	125	209	249	942	96	71	97	1218	586
<b>Ba</b>	6872	6222	8384	7036	8825	3380	4092	20148	8161



<b>TI</b>	5	17	7	154	8	15	8	98	1
<b>Pb</b>	475	1049	684	4598	528	1223	601	2961	1448

Type de minéralisations	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES
<b>ECH</b>	BAE70a	BAE70a	BAE70a	BAE3	BAE3	BAE3	BAE3	BAE3	BAE3	BAE3
<b>ZONE</b>	C	C	C	A	A	A	A	B	B	B
<b>Type IF</b>	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS
<b>taille (µm)</b>	15	20	15							
<b>forme</b>	ALLONGE RONDE	ALLONGE	ALLONGE							
<b>MINERAL</b>	QTZ 2	QTZ 2	QTZ 2	CALC 4.2	CALC 4.2	CALC 4.2	CALC 4.2	CALC 4.2	CALC 4.2	CALC 4.2
<b>Li</b>	965	898	2261	421	1039	314	1101	892	968	804
<b>B</b>	1579	399	545	160	565	132	493	28	451	447
<b>Na</b>	69010	88711	50122	72416	63942	74855	62184	64749	65457	65138
<b>Mg</b>			840	720	4100		3043	4125	1139	
<b>Si</b>				9050	10104	6949			13246	
<b>S</b>	10978			1918	674					2625
<b>Cl</b>	223973	123773	407181	110085	146781	92946	134894	130782	99964	158074
<b>K</b>	77075	24545	127439	23729	46324	17225	51011	44171	42283	43133
<b>Ca</b>	925086	72453	1045339							
<b>Mo</b>	31041	7239	25209	1755		9821		38676	12522	190
<b>Fe</b>	2718	4186				11547		75629	9193	3934
<b>Co</b>	27		1		3		0	24		
<b>Ni</b>	32	74	7		36			134		9
<b>Cu</b>	325	116	107		11	352	7			
<b>Zn</b>	11051	5519	18830	1010	2146	1437	1668	2407	1517	2951
<b>As</b>	1	41		10	1		2		77	
<b>Br</b>	3847	4337	20414	4685	8479	3621	5226	11435	5156	6143
<b>Rb</b>	844	105	1240	107	202	81	263	306	250	280
<b>Sr</b>	20247	3148	26614	5133	14962	2039	15665		5978	6100
<b>Mo</b>						2	6			87
<b>Ag</b>	6		9	2	6	6	6	15	14	
<b>Cs</b>	737	400	1185	59	106	49	124	143	89	138
<b>Ba</b>	88894	4435	4716	2332	5593	3956	5628	5349	4278	5112
<b>TI</b>	85	68	76	8	5	3	10	8	9	13
<b>Pb</b>	2358	1139	2023	299	157	435	171	183	139	533

Type de minéralisations	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES
<b>ECH</b>	BAE3	BAE3	BAE3	BAE3	BAE3	BAE3	BAE3	BAE3	BAE3	BAE3	BAE3
<b>ZONE</b>	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	B
<b>Type IF</b>	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS
<b>taille (µm)</b>											
<b>forme</b>											
<b>MINERAL</b>	CALC 4.2	CALC 4.2	CALC 4.2	CALC 4.2	CALC 4.2	CALC 4.2	CALC 4.2	CALC 4.2	CALC 4.2	CALC 4.2	CALC 4.2
<b>Li</b>	503	434	489	271	272	279	616	485	498	460	330
<b>B</b>	108	163	261	97	16	201	374	298	315	378	167
<b>Na</b>	75150	75552	75221	74309	73949	74551	70709	73289	73643	73569	74536
<b>Mg</b>			7738			5489	7005		2858		2837
<b>Si</b>		69065	3275	29348	275225	4121			10615	16902	
<b>S</b>			1320	3991		668		3547	736	3914	
<b>Cl</b>	103518	107473	109387	105590	114073	107513	161782	83415	86122	85355	104138
<b>K</b>	16439	15367	16248	18679	19641	18036	28279	21400	20456	20654	18075

Ca											
Mo			114	1643		1170	18014	7122	2416	7796	5392
Fe	25608	10943	4707		14953	847	14950	14481	12373	6476	7049
Co						4	1			1	0
Ni			24			15					2
Cu		70		2	84	7	55	6	3	9	
Zn	1506	1284	1519	1218	2053	1474	1493	910	814	999	1404
As		461	73		211				89	13	7
Br	2349	6056	4396	3322	4805	3166	7100	3114	2532	2678	3229
Rb	122	104	125	130	81	100	194	100	97	99	103
Sr	4817	10625	8295	5629	6774	6511	7266	3085	3305	3225	5729
Mo	67			48			124		2	34	8
Ag				5		3	24				
Cs	38	90	88	41	68	33	119	45	56	56	46
Ba	2872	2775	3205	4325	3865	4448	6058	2249	2161	2015	4010
Tl	12	17	23	9		4	13	2	2	1	6
Pb	477	791	620	431	794	430	795	201	205	212	469

Type de minéralisations	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES	VEINES
ECH	BAE3	BAE3	BAE3	BAE3	BAE3	BAE3	BAE3	BAE3	BAE3	BAE3	BAE3
ZONE	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Type IF	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS	LVS
taille (µm)											
forme											
MINERAL	CALC 4.2	CALC 4.2	CALC 4.2	CALC 4.2	CALC 4.2	CALC 4.2	CALC 4.2	CALC 4.2	CALC 4.2	CALC 4.2	CALC 4.2
Li	357	925	855	169	496	2431	770	640	579	573	468
B	216	329	224		511	752	301	228	41	220	200
Na	74310	61042	71312	83222	75881	45253	75976	77360	75018	77988	78935
Mg		21101	14618	2972			72909	2547		536	
Si								16689	3250		3372
S		11071		2626	2245		13175	3674			
Cl	107910	229322	171032	54203	91649	519103	85929	95557	108327	87427	81494
K	18678	54056	39993	8237	27810	109477	27557	23868	30111	22192	19668
Ca											
Mo	9878	55330					32331	4201		57	10178
Fe	25714	40624					16636				34128
Co	1		5		1			19	35	36	3
Ni	79		143			614	104			17	137
Cu			89	4	74	61		8		92	2
Zn	1117	4803	3165		1307	11161	3638	1445	1107	1276	1347
As	49			8	86			411			
Br	3309	11557	9776		1167	29170	5915	4358	8679	3633	3385
Rb	92	212	270	27	99	695	303	170	189	102	105
Sr	4282	12113	12551	13600	31387	23056	13672	6147		5055	2190
Mo	40	11	48				6		153	78	11
Ag				21		47					19
Cs	51	134	201	13	55	414	99	70	138	59	43
Ba	3897	13366	6394	2269	3578	23107	5767	3719	2846	3467	2772
Tl	2	19	2	0	18	132	0	11	6	7	2
Pb	537	548	539	103	217	2862	427	532	127	341	289

**Annexe III.4A : Tableau de données des inclusions individuelles solides riches en sel dans la gangue siliceuse des minéralisations massives de Bou Azzer**

LAME	BAE46A	BAE46A	BAE46A	BAE46A	BAE46A	BAE46A	BAE46A	BAE46A	BAE46A	BAE46A
MINERAL	QTZ 1.1	QTZ 1.1	QTZ 1.3	QTZ 1.3	QTZ 1.3	QTZ 1.3	QTZ 1.3	QTZ 1.3	QTZ 1.3	QTZ 1.3
Type IF	Inc. Sol	Inc. Sol	Inc. Sol	Inc. Sol	Inc. Sol	Inc. Sol	Inc. Sol	Inc. Sol	Inc. Sol	Inc. Sol
Li					216	7664		7		
B	201	760			540	1058	61	62	289	
Na	393395	393395	393395	393395	393395	393395	393395	393395	393395	393395
Mg										162
Si										
S								2652	5774	18126
Cl	515656	459069	548118	516534	633603	632800	581817	519566	539477	490201
K			539			2148	601	9	213	1737
Ca	9401		7659		31321	18650				138581
Mn										
Fe			232	602						159
Co		3		14		55		9	4	15
Ni	7	138	13			651			58	17
Cu	28		6	48	121		18			
Zn					644				200	1144
As							337			
Br	88	148					236	489	254	
Rb				4						
Sr			16				58			367
Mo	11	224	14				36	86	12	356
Ag	59	37			13		14	28	20	47
Cs						39	7		3	
Ba			58			202				
Tl	3		1	0	3		5	4	2	
Pb			7	3	13	116			21	28

## Annexe III.4B : Tableau de données des inclusions individuelles solides riches en sel dans la gangue carbonatée des poches de Bou Azzer

LAME	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1	BAE59a1
MINERAL	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1
Type IF	Inc. Sol	Inc. Sol	Inc. Sol	Inc. Sol	Inc. Sol	Inc. Sol	Inc. Sol	Inc. Sol	Inc. Sol	Inc. Sol	Inc. Sol	Inc. Sol	Inc. Sol	Inc. Sol	Inc. Sol	Inc. Sol	Inc. Sol
Li				2	2		2		5	2	1		3			1	
B	566		4	35	4					7	1			106	1	2	45
Na-SCA17	393395	393395	393395	393395	393395	393395	393395	393395	393395	393395	393395	393395	393395	393395	393395	393395	393395
Mg					2693					293	349		714	86		167	1492
Si		413				1057	1675	45076		6238						952	
S		361		350		131	385	1256		622	65			189	280		1157
Cl	869982	6848920	3986530	3017610	2340740	1882460	1665110	1492030	1470400	1277770	1309060	1153970	1054480	912433	771774	679716	696494
K	5849	220	295	858	396	201	218	602	505	343	325	219	556	502	178	652	831
Ca																	
Mn	3327				1926					1012	217		7331	1687		2529	14086
Fe	3286			52	415		660	4031		1112	51					53	2857
Co	81	0		0	0								4			0	
Ni	280		2	5	5	0		11					34	5			
Cu	203	25	28	26	27	29	35		36	40	29	109	49	28	28	34	7
Zn	3145	81	29	85	45			43	6	21	150	26	21	32			442
As	474	7		4	14	4			6		6	12		3	2	0	
Br		13875	6456	6669	4717	3343	3346	1851	1803	1479	1782	1868	1595	2145	978	1059	717
Rb			0	1	1	0	0		0	0	0	1	3	0	0	0	19
Sr	1555	153	70		126	86		807				58	452	40		71	
Mo				2				39	1	8		6		1			
Ag		1	2	1	1	2	1	18	1	2	1	5		1			
Cs	81		1	0	3	0	0	0	0			1	3	1			
Ba	1098	25	58	31	126	29	57	28	45	9	32	61	122	28	17	88	196
Tl	51			0	0		0		0	0	0			0			1
Pb	974	0	6	5	25	3	2	10	4	6	5	10	29	10	1		23

## Annexe Chapitre IV

**Annexe IV.1: Données individuelles des analyses effectuées au laser ICP-MS dans les arséniures de Bou Azzer en fonction des gisements étudiés (l'élément en gris représente des teneurs sur-enrichies)**

### Annexe IV.1A : Nickeline

Type de minéralisation	Arséniures	Concentration (ppm)																								
		Ni (std interne)	Co	Fe	As	S	Cu	Zn	Ga	Ge	Pb	Cr	Mn	Mo	In	Sn	Sb	Tl	Te	W	Bi	Se	Hg	Au	Ag	Cd
Serp.	Nick. 1	433384	11360	115	476268	3342	-	-	-	15	1	-	-	-	3	-	10	-	--	--	14	--	-	1,1	-	-
Min. massives	Nick. 1	433384	926	156	548106	1739	493	-	-	5	0	-	-	-	3	-	69	-	--	--	9	--	1	-	10	-
Min. massives	Nick. 2	433384	534	508	519071	2091	14	-	-	5	0	-	-	-	3	-	50	-	--	--	3	--	0	0,2	-	-
Min. massives	Nick. 2	433384	8681	28278	707209	18298	352	-	-	9	14	32	-	-	4	-	65	-	--	--	90	--	2	2,6	15	-

### Annexe IV.1B : Rammelsbergite

Type de gisement	Arséniures	Concentration (ppm)																								
		Ni (std interne)	Co	Fe	As	S	Cu	Zn	Ga	Ge	Pb	Cr	Mn	Mo	In	Sn	Sb	Tl	Te	W	Bi	Se	Hg	Au	Ag	Cd
Serp.	Ram.	220798	28107	632	617285	3431	-	-	-	32	0,3	-	1,46	-	3	0,2	13	-	--	--	5,9	--	0,3	0,002	-	-
Min. massives	Ram.	220798	1041,6	138	442104	1666	-	-	-	4,1	-	-	-	-	2	-	38	-	--	--	21	--	-	0,001	0,001	-
Min. massives	Ram.	220798	10775	1097	475581	65177	-	-	-	28	0,1	3,1	0,7	0,37	2	0,1	44	-	--	--	16	--	-	0,004	-	-

**Annexe IV.1C : Cobaltite**

Type de minéralisation	Arséniure	Concentration (ppm)																								
		Co (std interne)	Fe	Ni	As	S	Cu	Zn	Ga	Ge	Pb	Cr	Mn	Mo	In	Sn	Sb	Tl	Te	W	Bi	Se	Hg	Au	Ag	Cd
Poches	Cob.	327798	43336	100068	592453	301846	74	-	-	7	14	6	4	1	3	-	6	0	--	--	153	--	0,4	0,7	1,1	-
Poches	Cob.	327798	52702	95278	567044	291305	22	-	-	7	3	-	2	-	3	-	5	0	--	--	73	--	-	0,4	1,3	-
Veines	Cob.	327798	22328	107831	573675	279717	160	-	-	3	129	-	2	2	3	-	130	0	--	--	1287	--	5,3	1,6	8	-
Veines	Cob.	327798	19584	126848	586842	286754	136	5	-	4	135	-	3	30	3	-	162	0	--	--	1403	--	6,1	1,2	10	-
Veines	Cob.	327798	37478	161810	664818	297371	148	-	-	5	31	-	-	-	3	-	134	0	--	--	1061	--	1,3	-	10	-
Veines	Cob.	327798	39500	101227	568031	249693	203	-	-	-	16	-	-	-	2	-	144	-	--	--	1324	--	-	-	5	-
Veines	Cob.	327798	10830	1262950	3622120	316461	50	-	-	171	1	-	-	-	20	-	280	-	--	--	164	--	3,7	0,0	-	-

**Annexe IV.1D : Skuttérudite**

Type de minéralisation	Arséniure	Concentration (ppm)																								
		Co (std interne)	Fe	Ni	As	S	Cu	Zn	Ga	Ge	Pb	Cr	Mn	Mo	In	Sn	Sb	Tl	Te	W	Bi	Se	Hg	Au	Ag	Cd
Serp.	Sk. Fract.	188884	8192	12106	805216	15309	-	-	-	9	0	-	-	-	5	0	16	-	-	-	4	--	1	0,2	-	0
Serp.	Sk. Fract.	188884	17445	37883	1031875	4042	40	-	-	15	1	-	-	9	6	-	15	-	-	-	5	--	0	0,1	0,4	-
Serp.	Sk. Fract.	188884	37302	3938	828464	13949	8	-	-	8	1	-	-	-	5	-	13	-	-	-	48	--	0	4,5	0,8	-
Min. massives	Sk.	188884	17435	24355	1127060	39992	117	-	-	12	1	-	-	-	5	0	82	-	-	-	335	--	4	2,8	9	-
Min. massives	Sk.	188884	35849	33377	1224480	23853	92	-	-	13	2	-	-	-	7	-	53	-	-	-	98	--	2	3,5	8	-
Min. massives	Sk.	188884	353769	189888	2356750	34619	96	-	-	53	15	-	-	-	12	-	10649	-	-	-	147	--	2	5,9	14	-
Veines	Sk.	188884	45858	25739	1002830	10240	71	-	-	12	-	-	-	-	6	-	33	-	-	-	4	--	-	9	-	-
Veines	Sk.	188884	87219	80296	1428070	-	95	82	-	-	35	-	2417	-	7	-	26	-	-	-	30	--	-	-	-	-
Veines	Sk.	188884	76884	75421	1126220	11400	607	-	-	9	11	-	36	8631	7	-	16	1	-	-	373	--	-	2,2	71	-

**Annexe IV.1E : Loellingite**

Type de minéralisation	Arséniure	Concentration (ppm)																								
		Fe (std inerne)	Co	Ni	As	S	Cu	Zn	Ga	Ge	Pb	Cr	Mn	Mo	In	Sn	Sb	Tl	Te	W	Bi	Se	Hg	Au	Ag	Cd
Poches	Loll.	254701	36775	1238	1961410	1493	524	39	-	7	62	-	8	-	7	-	14	-	-	-	344	--	--	2,5	2,2	-
Poches	Loll.	254701	36939	92	1925570	1356	5	-	-	7	0	-	2	-	7	-	4	-	-	-	50	--	--	0,3	-	-
Poches	Loll.	254701	54377	1334	1880930	622	5	-	-	7	0	18	2	-	6	-	10	0	-	-	59	--	--	0,8	0,3	-
Poches	Loll.	254701	49723	4083	2166430	954	11	-	-	8	0	18	3	42	7	-	6	0	-	-	59	--	--	-	0,5	-
Poches	Loll.	254701	107564	1390	2403390	883	12	-	-	9	2	39	5	57	8	-	8	-	-	-	83	--	--	0,4	0,4	-
Veines	Loll.	254701	14553	167	1439650	1000	26	3	-	6	0	-	2	-	6	-	27	-	-	-	133	--	--	0,2	0,5	-
Veines	Loll.	254701	36673	220	1888670	1163	89	-	-	9	12	-	2	-	8	-	29	-	1	-	83	--	--	0,3	1,4	-
Veines	Loll.	254701	33168	240	1573080	1692	19	-	-	8	0	-	2	1	7	0	15	-	-	-	33	--	--	0,3	0,6	-

**Annexe IV.2: Données individuelles des analyses effectuées au laser ICP-MS dans les sulfures de Bou Azzer en fonction des gisements étudiés (Ars. : arsénopyrite, Cp. : chalcopyrite, Sp. : sphalérite)**

**Annexe IV.2A : Arsénopyrite**

Type de minéralisation	Sulfure	Concentration (ppm)																								
		Fe (std interne)	Co	Ni	As	S	Cu	Zn	Pb	Ga	Ge	Cr	Mn	Mo	In	Te	Sn	Tl	W	Bi	Sb	Se	Hg	Au	Ag	Cd
Veines	Ars.	353957	1598	4	355712	197634	5	-	1	-	4	-	2	-	2	-	-	-	-	2	17	-	-	-	0,4	-

**Annexe IV.2B : Sphalérite**

Type de minéralisation	Sulfure	Concentration (ppm)																								
		Zn (std interne)	As	S	Cu	Co	Fe	Ni	Ga	Ge	Pb	Cr	Mn	Mo	In	Sn	Sb	Tl	Te	W	Bi	Se	Hg	Au	Ag	Cd
Min. massives	Sp.	649528	39	294256	2138	4	9298	-	0	5	0	-	2268	-	74	0	-	-	-	-	0	-	18	-	3,7	1
Min. massives	Sp.	649528	251	307421	279	-	8386	-	-	586	530659	-	2467	-	373	-	-	2	-	-	489	-	12	-	0,2	1

**Annexe IV.2C : Chalcopyrite**

Type de minéralisation	Sulfure	Concentration (ppm)																								
		Cu (std interne)	Fe	As	S	Zn	Ga	Ge	Pb	Co	Ni	Cr	Mn	Mo	In	Sn	Sb	Tl	Te	W	Bi	Se	Hg	Au	Ag	Cd
Min. massives	Cp.	343800	305344	199	382255	7	-	3	1	-	-	-	-	-	26,7	4	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-



### Annexe IV.3: Données individuelles des analyses effectuées au laser ICP-MS dans les carbonates de Bou Azzer en fonction des gisements étudiés

#### Annexe IV.3A : les minéralisations massives

Minéral Type de minéralisations	Calc1	Calc1	Calc1	Calc1	Calc1	Calc1	Calc1	Calc1	Calc1	Calc1	Calc1	Calc1	Calc2.1	Calc2.1	Calc2.1	Calc2.1	Calc2.1	Calc2.1	Calc2.1	Calc2.1	Calc2.1
	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives
Ca (Std interne)	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852
Na	5	359	50	11	41	23	1	61	57	338	454	163	67	147	63	90	82	72	145	225	7
Mg	49	628	1052	1353	1724	1716	197	583	548	536	544	527	1480	1485	1950	1315	1319	1306	1240	1604	1507
Al		432	2												415	12	19		1	42	
Si	840	5090	969	1091	1140	1095	928	1035	1133	1231	1334	1256	876	996	1678	970	1037	825	1024	1163	960
K		67	5	4	16	6		59	15	61	146	36	14	33	45	29	28	16	39	88	8
Mn	644	636	4348	4600	3305	3527	2589	3528	3532	3385	3117	3417	2868	2877	2661	2736	2777	2676	2749	2896	2829
Fe	14	245	1655	1935	1297	1359	286	850	1003	788	691	832	1022	1032	1479	968	959	912	951	2813	1114
Li		16,86						1,44	3,01	0,75	0,42	0,91	3,79	0,53	0,48	0,22	0,66	0,22	0,66	2,03	0,26
B	0,21	1,29			0,25	0,37		0,73	0,41	0,88	1,10	0,69	0,37		0,84	1,31	0,91	1,29	1,24	1,79	2,67
Co		21,38				0,03		5,82	1,26	0,06	0,05				0,18	0,39	0,12	0,06	0,08	0,20	0,09
Ni		52,60	1,09				39,97	13,58				1,08			12,70	1,14	1,16			3,62	
Cu		4,79	0,08					0,16	0,05	0,10	0,07	0,21			0,28	1,09	0,08	0,54	0,14	0,27	0,32
Zn		12,00	1,07	0,41	1,11	0,99	0,41	2,11	1,93	7,70	9,03	6,63	1,58	2,87	4,26	2,52	8,83	1,71	4,27	116,61	1,57
Ga	0,10	1,09	0,26	0,06	0,25	0,20		0,72	0,31	1,36	2,21	0,79	0,13	0,35	0,79	0,62	0,56	0,65	0,78	1,20	0,15
Ge	0,23		1,82	1,65	2,14	3,13		0,57	0,25	0,23		0,27	0,71	0,43	0,46	0,26	0,41	0,37	0,46	1,06	0,56
Ag		0,15						0,04									0,02			0,01	
As		280,52	1,65	1,99	1,64	2,72	111,62	66,96	2,12	3,68	2,45	3,61	0,93	0,97	1,01	3,10	1,47	0,91	1,10	1,49	0,91
Sc	0,12	0,29	5,52	2,56	0,18	0,20	0,45	3,35	2,95	2,04	2,07	2,05	6,81	6,79	14,18	11,67	12,17	16,35	15,12	13,10	40,36
Ti		27,55			0,31										0,60					10,35	
V		0,19	0,30	0,15	0,34	0,47						0,05			2,01	0,15	0,19	0,10	0,05	12,84	0,15
Cr	0,45	5,03	8,24	0,87	1,43	1,58						0,56	5,00	5,39	307,33	17,23	25,45	6,60	5,23	1573,33	5,15
Rb		0,36	0,04	0,03	0,12	0,06		0,44	0,07	0,33	1,02	0,20	0,09	0,16	0,22	0,15	0,10	0,09	0,21	0,39	0,06
Sr	115,74	100,55	191,54	229,50	248,98	278,36	143,42	190,72	183,70	205,12	238,71	197,34	218,92	217,08	199,05	205,03	208,19	214,73	215,44	241,54	207,99
Y	0,94	3,73	82,54	45,74	216,50	270,11	3,80	22,57	19,87	22,93	28,60	20,69	45,99	45,83	42,85	37,62	43,27	45,75	45,25	33,56	126,93
Zr	0,01	2,70													0,01					0,01	
Nb		0,14																		0,00	
Cs	0,00	0,13	0,02	0,01	0,09	0,02		0,36	0,06	0,22	0,59	0,13	0,04	0,09	0,24	0,10	0,08	0,07	0,13	0,29	0,05
Ba	1,24	11,60	2,32	0,69	2,90	2,57	0,91	7,86	3,81	16,64	25,10	9,93	1,89	5,02	8,32	7,05	6,55	8,26	10,34	14,72	1,59
La	27,12	0,77	6,86	14,59	21,52	27,54	0,68	2,76	2,69	3,61	4,10	6,88	6,52	7,09	14,79	10,00	9,19	15,20	12,38	33,49	7,50
Ce	24,81	1,09	32,25	57,32	72,18	90,11	1,59	7,92	7,13	8,75	10,22	15,66	16,71	17,86	25,93	20,12	19,42	26,76	22,43	52,14	21,56
Pr	1,53	0,16	6,60	10,56	12,63	16,53	0,28	1,42	1,14	1,36	1,50	2,29	2,72	2,79	3,39	2,86	2,81	3,53	3,01	6,09	3,72
Nd	3,53	0,67	40,54	57,85	70,99	92,65	1,80	8,71	6,18	7,12	8,06	11,44	13,64	14,98	15,36	13,86	13,87	16,50	14,02	25,26	21,00
Sm	0,20	0,17	21,92	22,88	29,65	39,72	0,61	3,59	2,36	2,53	2,98	3,40	5,04	5,42	5,26	4,79	5,05	5,33	5,00	6,46	10,08
Eu	0,00	0,00	0,35	0,30	0,85	1,18	0,02	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,20	0,23	0,60	0,53	0,58	0,61	0,52	1,02	0,91
Gd	0,13	0,24	32,25	25,96	42,49	58,13	0,64	4,76	3,14	3,39	4,12	3,93	6,97	7,02	7,42	7,10	7,72	7,86	7,31	7,62	17,27
Tb	0,01	0,03	4,58	3,23	7,03	9,52	0,09	0,78	0,51	0,56	0,72	0,60	1,24	1,26	1,29	1,15	1,32	1,37	1,32	1,14	3,26
Dy	0,09	0,28	21,51	13,36	40,52	54,60	1,13	3,70	3,05	3,41	4,26	3,22	7,07	7,25	7,61	7,00	7,72	8,15	7,84	5,98	21,37
Ho	0,02	0,07	3,10	1,76	7,39	9,58	0,10	0,72	0,60	0,67	0,84	0,63	1,42	1,45	1,36	1,22	1,38	1,55	1,48	1,08	3,92
Er	0,05	0,20	5,65	3,22	17,83	22,20	0,24	1,73	1,59	1,86	2,27	1,58	3,55	3,69	3,35	3,00	3,54	3,84	3,74	2,64	9,93
Tm	0,01	0,04	0,58	0,33	2,12	2,44	0,03	0,21	0,23	0,26	0,32	0,22	0,49	0,47	0,42	0,47	0,51	0,52	0,32	1,46	1,46
Yb	0,07	0,30	3,06	1,63	11,19	12,34	0,32	1,48	1,61	1,68	2,12	1,46	3,15	3,13	3,29	2,89	3,37	3,75	3,63	2,47	10,40
Lu	0,01	0,07	0,44	0,21	1,15	1,31	0,05	0,24	0,24	0,24	0,29	0,22	0,45	0,43	0,51	0,44	0,50	0,60	0,55	0,39	1,60
Hf		0,06			0,00																
Ta		0,32								0,00										0,00	0,00
Bi		0,26					2,85	0,39							0,01	0,07	0,07		0,00	0,00	0,00
Pb		1,10	0,09	0,07	0,28	0,68	1,55	0,64	0,38	1,64	1,96	0,93	0,39	0,63	0,64	0,98	2,82	0,34	0,92	1,21	0,35
Th		0,13													0,00	0,00	0,00			0,00	0,00
U		0,13									0,00				0,00	0,00				0,00	0,00

## Annexe IV.3: Données individuelles des analyses effectuées au laser ICP-MS dans les carbonates de Bou Azzer en fonction des gisements étudiés

### Annexe IV.3A : les minéralisations massives - suite

Minéral Type de minéralisations	Calc2.1	Calc2.1	Calc2.1	Calc2.1	Calc2.1	Calc2.1	Calc2.1	Calc2.1	Calc2.1	Calc2.1	Calc2.1	Calc2.1	Calc2.1	Calc2.1	Calc2.1	Calc2.1	Calc2.1	Calc2.1	Calc2.1	Calc2.1	Calc2.1
	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives
Ca (Std interne)	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852
Na	57	53	19	47	16	68	327	621	55	379	26	11	109	1	22	26	3	125	197	27	57
Mg	1568	1549	2050	2227	1884	2206	3536	2819	1554	1675	1220	1114	10079	1809	1374	1529	1801	2001	1524	2337	3126
Al	25	23	2	61	157	147	23	9	6	6	1	246	232	6	69	18	1	2	1	2	2
Si	999	1110	1083	846	1148	1609	4191	3147	3152	1224	1492	1019	23209	1758	898	1401	1263	1705	2003	3003	3749
K	17	18	4	21	3	18	57	297	13	162	2	1	50	1	6	8	1	25	47	7	10
Mn	2752	2726	2730	3081	2852	2829	3562	3605	3291	3362	3539	3302	4558	3687	3127	3409	3409	3432	3294	3261	3385
Fe	1093	1208	1106	1454	1244	1868	1405	1226	1097	1080	1129	997	8530	1295	1147	1091	1186	1380	1153	1109	1204
Li	0,42	0,61	0,13	0,54	0,78	1,05	3,89	7,97	0,50	3,59	0,15	2,52	1,72	0,41	0,22	1,19	1,32	0,17	1,32	0,17	0,38
B	1,20	0,92	0,37	0,26	0,52	0,54	1,62	3,46	0,74	3,56	1,23	0,61	0,08	0,03	0,26	1,04	1,13	0,47	1,04	0,61	0,61
Co	0,06	0,45	0,04	0,08	0,14	0,34	0,55	0,88	0,69	0,06	0,03	0,16	0,08	0,03	0,08	0,14	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Ni	0,98	1,66	3,20	5,28	41,27	28,54	5,69	7,36	0,63	7,72	1,37	9,57	3,68	3,17	3,64	1,35	12,44	20,03	20,03	20,03	20,03
Cu	0,37	69,31	18,27	0,04	0,12	2,24	0,26	0,23	0,31	0,27	0,07	0,80	0,20	0,43	2,34	1,94	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
Zn	5,56	5,40	11,18	0,81	1,31	21,91	4,26	6,79	4,47	10,69	0,52	0,34	4,92	1,50	0,48	1,04	3,77	6,29	1,03	1,58	1,58
Ga	0,40	0,55	0,20	0,22	0,26	0,66	1,04	4,25	0,37	1,74	0,20	0,23	0,50	0,15	0,42	0,17	1,09	1,04	0,22	0,33	0,33
Ge	0,70	0,36	0,38	2,47	1,00	1,05	3,17	2,43	2,96	2,33	0,92	1,01	3,74	5,77	0,50	1,71	4,12	2,69	2,19	1,98	2,02
Ag	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
As	1,04	3,37	1,20	1,06	1,52	1,47	2,53	2,70	3,52	3,54	2,07	1,94	4,68	2,14	2,03	1,91	2,22	3,44	2,67	1,95	1,94
Sc	17,16	12,36	8,58	10,28	29,77	19,24	2,28	3,53	12,29	13,10	25,37	25,21	41,11	9,06	23,30	9,58	9,23	11,74	10,53	7,60	7,14
Ti	0,36	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
V	0,36	0,17	0,09	0,60	0,82	4,06	1,16	0,53	0,26	0,12	0,29	0,13	4,88	0,55	1,41	0,19	0,36	0,81	0,39	0,18	0,19
Cr	34,42	20,99	7,68	8,05	63,70	367,55	105,42	36,72	6,53	5,12	5,48	3,61	68,24	7,76	115,52	10,03	11,08	36,02	10,12	2,09	2,00
Rb	0,09	0,08	0,02	0,11	0,02	0,10	0,26	1,42	0,08	0,81	0,02	0,01	0,10	0,02	0,04	0,03	0,11	0,20	0,05	0,07	0,07
Sr	205,96	196,12	199,93	251,31	206,96	217,37	257,84	296,04	231,08	241,15	209,64	187,36	255,80	298,38	191,62	210,50	252,87	252,54	257,67	214,38	209,97
Y	67,51	36,04	22,57	289,62	171,14	181,46	55,92	39,07	79,38	69,86	111,73	59,50	131,19	165,12	60,83	61,58	119,95	86,40	87,93	59,89	58,66
Zr	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Nb	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cs	0,05	0,05	0,01	0,06	0,01	0,08	0,16	1,00	0,04	0,56	0,01	0,00	0,06	0,01	0,02	0,02	0,01	0,08	0,14	0,03	0,05
Ba	5,06	6,55	2,62	3,22	3,20	7,75	7,40	33,30	3,01	14,94	1,26	1,99	3,48	0,65	2,65	1,41	0,64	9,73	8,76	1,73	2,59
La	16,27	16,19	15,04	24,38	11,53	13,52	29,24	22,75	48,54	33,68	6,04	6,17	29,70	31,17	2,59	12,93	28,48	19,21	17,33	18,27	20,05
Ce	34,29	29,18	26,70	80,56	35,72	37,12	67,19	50,19	90,34	68,73	18,38	16,47	78,68	85,87	8,30	33,37	71,97	49,79	45,42	40,52	42,00
Pr	4,86	3,78	3,42	14,77	6,28	6,25	10,01	7,34	12,44	9,42	3,31	2,77	12,86	14,42	1,51	5,45	11,76	7,99	7,43	6,03	6,25
Nd	24,33	17,59	15,09	87,08	35,85	35,98	49,41	36,54	57,78	43,21	19,10	15,22	67,72	78,10	9,07	28,80	61,14	42,73	39,33	30,68	32,41
Sm	8,67	5,38	4,21	39,45	16,36	16,17	15,69	11,47	16,35	13,31	9,79	6,34	24,61	29,80	4,72	10,98	22,11	15,62	15,07	10,88	10,74
Eu	0,82	0,69	0,61	3,63	1,46	1,66	1,55	1,55	1,10	0,90	0,64	0,41	1,74	2,09	0,28	0,85	1,57	1,13	1,16	1,04	1,02
Gd	12,59	7,24	5,18	63,19	27,94	28,56	19,07	13,85	19,98	15,79	16,76	9,65	33,06	42,12	8,33	14,67	30,09	20,95	21,24	14,10	14,54
Tb	2,11	1,16	0,75	10,62	4,92	5,13	2,67	1,89	2,93	2,57	3,19	1,71	5,05	6,43	1,65	2,22	4,54	3,15	3,25	2,19	2,15
Dy	12,28	6,93	4,16	62,55	31,98	31,70	12,72	9,15	15,41	13,50	18,93	9,96	26,17	33,95	10,16	11,81	23,53	17,11	16,66	11,65	11,27
Ho	2,18	1,21	0,72	10,45	5,57	5,80	1,92	1,35	2,56	2,32	3,48	1,89	4,26	5,73	1,92	1,97	3,95	2,85	2,79	2,03	1,87
Er	5,34	3,04	1,68	22,71	13,76	14,65	3,57	2,37	5,86	4,87	9,08	4,98	9,26	12,65	5,13	4,44	8,56	6,47	6,47	4,45	4,31
Tm	0,73	0,43	0,22	2,59	1,86	1,84	0,32	0,22	0,68	0,63	1,25	0,70	1,07	1,39	0,74	0,51	0,98	0,77	0,73	0,54	0,52
Yb	4,98	2,89	1,65	14,05	11,82	11,93	1,45	1,01	4,10	3,94	8,96	5,05	6,32	7,94	5,56	3,04	5,57	4,58	4,29	3,33	3,22
Lu	0,74	0,44	0,24	1,66	1,74	1,56	0,14	0,11	0,59	0,59	1,30	0,81	0,92	0,93	0,87	0,44	0,68	0,62	0,64	0,42	0,42
Hf	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ta	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Bi	0,11	0,11	0,01	0,28	0,34	0,47	0,98	1,82	0,50	1,79	0,05	0,08	0,35	0,05	0,19	0,13	0,07	0,64	0,86	0,19	0,27
Pb	1,05	0,88	0,40	0,28	0,34	0,47	0,98	1,82	0,50	1,79	0,05	0,08	0,35	0,05	0,19	0,13	0,07	0,64	0,86	0,19	0,27
Th	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
U	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

## Annexe IV.3A : les minéralisations massives - suite

Minéral Type de minéralisations	Calc2.1	Calc2.1	Calc2.1	Calc2.1	Calc2.1
	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives
Ca (Std interne)	408852	408852	408852	408852	408852
Na	192		43	5	16
Mg	3795	1205	2062	2166	2384
Al	1		1		0
Si	5480	1010	1269	1049	1021
K	37		8	4	4
Mn	3508	3396	3686	3778	3996
Fe	1249	1043	1370	1441	1723
Li	1,38		0,14		
B	0,89		0,49		
Co	0,17		0,03		0,05
Ni	33,76				0,44
Cu	0,15	0,04	0,11	0,08	0,05
Zn	3,35		1,18	0,22	0,45
Ga	0,68	0,06	0,22	0,17	0,22
Ge	1,59	2,04	3,74	4,46	10,51
Ag					
As	2,32	1,92	2,49	2,23	2,88
Sc	8,33	19,46	25,00	14,93	10,79
Ti	0,28				
V	0,18	0,30	0,75	0,65	0,91
Cr	2,46	1,78	2,50	2,42	1,97
Rb	0,18	0,02	0,07	0,05	0,05
Sr	223,32	209,96	248,33	276,85	406,12
Y	53,21	142,86	250,71	228,45	237,00
Zr				0,01	0,01
Nb					
Cs	0,13		0,02	0,02	0,02
Ba	6,41	0,14	1,83	1,54	0,98
La	16,70	13,94	17,79	30,32	95,50
Ce	35,41	43,47	62,72	94,09	243,21
Pr	5,22	7,61	11,89	16,55	38,36
Nd	26,44	42,99	71,64	95,96	194,35
Sm	9,09	18,20	33,13	39,45	66,59
Eu	0,95	1,35	1,70	2,28	4,46
Gd	11,96	26,58	52,98	59,08	82,49
Tb	1,90	4,57	8,76	9,04	11,49
Dy	10,36	25,92	49,18	48,16	54,87
Ho	1,75	4,60	8,86	8,01	8,36
Er	4,03	11,31	20,93	18,13	17,79
Tm	0,49	1,46	2,59	2,09	1,99
Yb	3,18	9,55	15,82	12,50	11,53
Lu	0,46	1,41	2,12	1,65	1,52
Hf					0,00
Ta					
Bi					
Pb	0,69	0,02	0,20	0,07	0,13
Th			0,00	0,00	0,00
U	0,00				0,00

### Annexe IV.3: Données individuelles des analyses effectuées au laser ICP-MS dans les carbonates de Bou Azzer en fonction des gisements étudiés

#### Annexe IV.3A : les minéralisations massives - suite

Minéral Type de minéralisations	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	
	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives
Ca (Std interne)	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852
Na	58	55	59	140	731	19	45	300	212	1	14	41	11	17	36	97	16	96			2	11
Mg	376	387	386	390	398	392	449	364	380	342	347	339	421	328	346	357	361	357	356	374	376	376
Al												1	5									
Si	1305	1405	1376	1469	1260	1345	1362	1346	1491	1370	1276	1157	1200	1305	1282	1433	1382	1260	1302	1223	1272	1272
K	17	13	19	89	582	11	282	15	211	1	3	13	3	5	11	25	5	26			1	3
Mn	4533	4560	4532	4613	4477	4599	4544	4554	4772	4502	4388	4404	4678	4531	4595	4793	4613	4606	4628	4695	4633	4633
Fe	830	816	786	796	791	783	805	800	810	764	731	754	933	855	883	912	893	901	915	962	956	956
Li	0,34	0,19	0,26	1,67	12,20	0,27	26,78	0,34	4,07			0,20	0,15	0,13				0,58				
B	0,17	0,25	0,36	0,83	1,51	0,31	2,64	0,33	0,72		0,20	0,55	0,26			0,44						0,29
Co					0,02	0,14	0,16	0,02	0,02	0,01		0,17	0,31	0,09	0,02	0,02	0,03	0,03	0,01	0,03	0,02	0,02
Ni	0,91			0,95	3,69	4,38				0,75		0,95	1,63	2,69	0,59							0,93
Cu			0,07	0,06	0,15	0,08	0,17					0,05	0,12	0,06								0,04
Zn	0,43	0,34	1,27	4,94	12,72	0,88	6,07	0,62	3,62	0,09	0,33	1,28	0,58	1,93	0,92	2,14	0,38	0,60			0,53	0,38
Ga	0,42	0,26	0,47	1,77	6,09	0,40	1,29	0,86	3,43	0,04	0,10	0,30	0,10	0,14	0,26	0,47	0,23	0,64	0,03	0,04	0,12	0,12
Ge	1,91	1,72	1,38	1,48	1,34	1,61	1,59	1,18	1,42	1,20	1,43	1,70	2,43	1,39	1,43	1,34	1,45	1,30	1,46	1,47	1,49	1,49
Ag																					0,01	0,01
As	2,30	2,24	2,66	2,76	2,93	4,83	5,06	2,31	2,46	2,14	2,29	2,80	4,72	5,12	2,31	2,81	2,35	2,38	2,30	3,32	2,74	2,74
Sc	0,41	0,46	0,46	0,49	0,46	0,59	0,62	0,56	0,59	0,65	0,90	0,91	2,67	0,40	0,17	0,17	0,14	0,20	0,15	0,13	0,16	0,16
Ti		0,45										1,19	1,30									
V	0,05		0,08	0,06	0,07	0,03				0,05		0,09	0,04	0,05	0,07	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06	0,10	0,10
Cr	0,48	0,77	0,87	0,75					0,63	0,63	0,70		1,52			0,73	0,70	0,54	0,51	0,67	0,67	0,67
Rb	0,11	0,07	0,09	0,54	3,07	0,08	4,20	0,08	1,31	0,01	0,02	0,06	0,02	0,03	0,06	0,14	0,03	0,15	0,01	0,01	0,02	0,02
Sr	344,91	321,42	294,49	318,42	437,86	277,62	330,30	255,14	345,70	245,70	250,67	259,12	314,78	254,02	265,32	274,93	263,70	273,17	269,48	284,17	270,69	270,69
Y	121,88	114,23	110,00	107,84	107,52	108,32	108,60	91,64	93,01	94,55	95,43	96,92	145,53	82,28	87,09	87,84	94,62	95,79	95,42	100,48	98,61	98,61
Zr	0,01					0,01	0,02					0,02	0,03					0,01				
Nb		0,00		0,00								0,01	0,01		0,00				0,00	0,00		
Cs	0,08	0,06	0,08	0,41	2,04	0,05	3,37	0,04	0,93		0,01	0,05		0,02	0,04	0,08	0,03	0,10		0,00	0,01	0,01
Ba	4,25	3,04	5,73	20,22	66,11	4,24	11,42	10,77	40,33	0,32	0,74	3,08	1,15	1,29	2,84	6,16	1,85	7,76	0,13	0,23	1,20	1,20
La	18,62	15,86	13,76	13,77	13,43	12,71	12,23	10,79	10,35	10,96	12,22	12,34	21,90	12,02	12,48	12,91	11,53	11,65	12,09	14,01	13,55	13,55
Ce	48,05	41,59	36,57	35,39	34,52	33,01	31,10	27,93	26,16	29,18	32,55	33,12	54,95	31,38	31,78	32,15	29,86	30,05	31,25	35,76	35,03	35,03
Pr	8,52	7,33	6,71	6,37	6,12	5,96	5,61	4,84	4,57	5,36	5,98	6,02	9,51	5,74	5,76	5,83	5,41	5,49	5,69	6,51	6,39	6,39
Nd	51,49	45,09	41,44	39,10	37,25	36,47	34,43	29,56	27,70	32,41	34,97	35,12	55,73	34,27	34,90	35,71	33,54	33,98	34,96	39,39	38,88	38,88
Sm	16,64	14,87	13,76	13,23	13,40	12,24	11,79	9,62	9,45	10,96	11,17	11,34	18,84	11,92	12,27	12,50	12,13	11,86	12,72	13,77	13,91	13,91
Eu	0,40	0,33	0,31	0,30	0,28	0,28	0,26	0,22	0,24	0,26	0,29	0,27	0,38	0,38	0,37	0,37	0,37	0,37	0,39	0,42	0,42	0,42
Gd	22,47	20,03	18,68	18,01	17,38	17,86	16,71	13,94	13,01	14,96	14,78	14,75	25,56	16,14	17,15	17,06	16,98	17,40	17,87	19,56	19,32	19,32
Tb	2,81	2,60	2,44	2,34	2,29	2,33	2,18	1,75	1,83	1,95	1,98	2,03	3,43	2,03	2,20	2,24	2,28	2,33	2,46	2,50	2,50	2,50
Dy	15,36	14,00	13,17	13,00	12,73	13,48	12,99	10,40	10,54	11,26	11,06	11,31	19,34	11,01	11,76	11,77	12,22	12,48	12,72	13,40	13,22	13,22
Ho	3,08	2,94	2,80	2,72	2,67	2,80	2,66	2,25	2,23	2,35	2,33	2,38	3,87	2,10	2,26	2,31	2,44	2,47	2,47	2,59	2,57	2,57
Er	7,59	7,59	6,82	6,77	6,81	7,03	7,01	5,94	6,14	6,23	6,36	6,50	9,98	4,98	5,16	5,42	5,91	5,85	6,01	6,09	6,07	6,07
Tm	0,82	0,82	0,79	0,74	0,75	0,80	0,79	0,69	0,71	0,72	0,75	0,76	1,20	0,49	0,51	0,54	0,60	0,60	0,59	0,60	0,60	0,60
Yb	4,25	4,23	3,95	3,99	4,16	4,28	4,23	3,86	4,08	3,84	4,38	4,56	7,09	2,37	2,41	2,48	2,90	2,98	2,82	3,01	2,76	2,76
Lu	0,47	0,50	0,48	0,49	0,41	0,51	0,50	0,46	0,51	0,47	0,58	0,59	0,95	0,29	0,25	0,25	0,33	0,33	0,31	0,32	0,30	0,30
Hf														0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
Ta	0,00		0,00	0,00								0,02	0,05		0,00							
Bi													0,00									
Pb	0,19	0,21	0,60	1,87	4,15	0,50	8,97	0,91	0,90	0,03	0,14	0,45	0,30	1,35	0,33	0,83	0,14	0,35	0,04	0,11	0,14	0,14
Th						0,00						0,00	0,00									
U			0,00			0,00	0,00					0,00	0,00	0,00					0,00			

### Annexe IV.3: Données individuelles des analyses effectuées au laser ICP-MS dans les carbonates de Bou Azzer en fonction des gisements étudiés

#### Annexe IV.3A : les minéralisations massives - suite

Minéral	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.
Type de minéralisations	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives
Ca (Std interne)	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852
Na	32	13	57	154	167	259	377	104	127	34	338	304	67	9	66	87	82	52	540	39	12
Mg	769	657	636	911	1120	834	835	933	904	865	976	991	723	902	1046	1071	1066	1081	1062	885	1022
Al		1	4	46	9	5	3		37	3		14	6	6	1	0	2	1	18	17	
Si	1269	1206	1169	1921	1180	1342	1541	965	1651	1174	995	1234	1349	1197	1182	1221	1153	1141	1035	1170	1102
K	8	6	17	43	52	60	225	36	87	8	228	79	13	3	19	32	18	16	44	13	3
Mn	4550	4886	4316	4309	4561	4193	4202	4328	4333	4170	4257	4280	4332	4397	4381	4407	4222	4237	4289	4106	4289
Fe	1461	1149	1190	1262	1678	1274	1312	1488	1354	1414	1444	1531	1270	1555	1638	1640	1596	1631	1609	1416	1392
Li	0,14		0,50	1,26	1,27	1,21	4,52	0,83	3,23	0,29	6,02	1,94	0,35		0,39	0,71	0,36	0,40	1,18	0,27	0,20
B	0,23	0,34	0,25	1,04	0,66	0,84	1,97	0,58	1,04	0,48	1,65	0,64	0,77		0,27	0,54	0,27	0,36	0,52	0,26	0,20
Co	0,05	0,47	0,04	0,65	0,03	0,37	0,17	0,02	3,15	0,34	0,05	0,06	0,32		0,19	0,02	0,05	0,04	0,08	0,05	0,14
Ni	0,59	4,08		1,76	0,62	0,99			5,88	2,14		1,04	2,28		1,92				2,14		
Cu	0,09	0,29		0,31	0,04	0,14	0,26	0,05	0,87	0,15	0,06	0,08	0,25	0,03	0,12	0,09	0,06	0,04	0,07	0,04	0,09
Zn	0,80	3,38	0,65	4,30	3,23	4,39	18,05	2,23	6,16	3,99	13,18	4,83	1,69	0,37	1,60	2,25	1,75	1,46	3,52	1,09	0,77
Ga	0,28	0,53	0,53	1,48	1,11	1,53	4,47	0,70	1,30	0,29	3,50	1,46	0,61	0,08	0,47	0,57	0,36	0,33	1,07	0,28	0,12
Ge	1,28	1,10	0,90	1,03	2,08	1,05	1,02	1,62	1,01	1,52	2,21	1,95	0,99	1,21	1,28	1,98	2,04	1,70	1,90	1,26	0,89
Ag																					
As	2,46	13,07	2,19	7,86	2,59	5,43	3,85	2,29	23,16	5,26	3,71	2,87	4,94	2,08	3,67	2,18	3,14	2,30	2,90	2,34	2,17
Sc	8,59	6,33	5,89	3,72	3,73	3,69	3,57	4,05	3,73	4,57	4,44	4,24	6,63	5,13	3,84	4,62	4,03	4,09	4,33	4,24	3,10
Ti		0,22	0,25	13,11	0,22	0,27			6,02	0,36			0,56		2,06						2,50
V	0,06	0,10	0,09	0,30	0,28	0,08	0,04	0,10	0,09	0,10	0,07	0,16	0,07	0,08	0,19	0,16	0,15	0,18	0,15	0,18	0,23
Cr	0,72	0,53	4,17	12,03	3,59	0,84	1,30	0,86	1,65	1,16	0,58	6,23	1,86	2,68	1,94	1,07	1,36	2,45	1,98	9,02	9,07
Rb	0,07	0,04	0,11	0,26	0,33	0,38	1,60	0,22	0,53	0,05	1,53	0,52	0,08	0,03	0,11	0,19	0,09	0,10	0,30	0,10	0,02
Sr	191,14	190,44	174,02	213,56	250,26	218,96	272,62	211,23	212,56	201,04	279,15	245,63	192,47	192,02	186,30	217,83	229,29	217,84	219,36	199,45	164,58
Y	70,83	59,81	49,71	70,16	94,76	41,61	41,62	43,64	34,33	44,35	46,72	44,87	57,79	68,21	65,08	59,34	58,08	59,74	58,46	61,18	60,30
Zr	0,00	0,03	0,01	0,41	0,00	0,06	0,04		0,55	0,02		0,01	0,05		0,02		0,02		0,01	0,01	0,21
Nb			0,00	0,04		0,00	0,00		0,04	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00		0,01				0,02
Cs	0,03	0,02	0,09	0,19	0,22	0,28	1,13	0,17	0,34	0,03	1,08	0,37	0,06	0,01	0,08	0,14	0,07	0,07	0,22	0,06	0,02
Ba	2,78	5,71	5,85	16,80	12,45	16,95	52,66	8,03	14,94	3,34	40,15	17,13	7,64	0,89	5,19	6,29	4,20	3,78	13,46	3,42	1,15
La	8,22	7,62	3,57	7,57	18,24	6,88	6,76	15,32	10,12	12,03	15,25	17,25	8,00	8,07	8,06	13,91	17,00	12,95	12,15	7,47	4,62
Ce	34,05	28,04	16,95	26,63	62,35	24,04	24,03	58,64	37,09	45,63	58,55	63,78	33,66	37,80	37,60	56,41	66,35	52,84	50,64	33,41	23,29
Pr	6,40	5,24	3,49	4,92	10,83	4,45	4,39	10,29	6,64	8,15	10,73	11,10	6,32	7,38	7,46	10,29	11,72	9,81	9,44	6,53	4,85
Nd	36,85	29,85	21,26	28,55	59,60	25,27	25,35	56,67	37,54	45,73	58,87	60,51	36,39	42,23	43,87	58,18	66,37	56,91	54,76	39,17	30,66
Sm	14,99	11,64	10,26	13,52	24,85	11,16	10,96	21,62	14,35	17,54	21,66	21,47	14,87	19,12	21,42	26,03	27,79	26,36	25,33	19,35	17,11
Eu	0,41	0,34	0,23	0,16	0,23	0,13	0,13	0,23	0,16	0,23	0,25	0,27	0,37	0,39	0,33	0,35	0,35	0,31	0,36	0,32	0,25
Gd	18,15	14,40	13,53	19,27	32,37	13,76	13,78	23,84	16,25	20,29	23,99	22,95	17,11	23,61	28,42	31,35	32,38	32,78	31,48	24,74	24,93
Tb	2,50	2,03	1,85	2,95	4,73	1,84	1,84	2,86	2,07	2,57	2,87	2,69	2,28	3,26	3,95	3,82	3,98	4,16	3,87	3,32	3,53
Dy	12,63	10,57	9,24	14,88	22,67	8,76	8,58	11,91	8,90	11,37	12,14	11,20	11,00	14,89	17,53	16,00	16,20	17,47	16,79	14,65	16,01
Ho	2,18	1,85	1,50	2,32	3,33	1,32	1,34	1,55	1,21	1,62	1,65	1,56	1,81	2,27	2,38	2,11	2,14	2,27	2,17	2,05	2,19
Er	5,10	4,28	3,54	4,70	5,98	2,85	2,67	2,89	2,23	2,94	3,12	2,90	4,41	4,69	4,41	3,82	3,76	3,83	3,93	4,07	3,95
Tm	0,64	0,56	0,44	0,48	0,48	0,31	0,29	0,28	0,23	0,30	0,30	0,29	0,48	0,53	0,45	0,40	0,38	0,36	0,38	0,46	0,39
Yb	4,25	3,69	3,07	2,49	1,87	1,95	1,88	1,49	1,27	1,81	1,73	1,79	3,24	3,33	2,47	2,43	2,19	1,99	2,13	2,77	2,12
Lu	0,63	0,54	0,46	0,33	0,19	0,27	0,29	0,23	0,18	0,25	0,24	0,26	0,48	0,48	0,33	0,34	0,31	0,27	0,30	0,39	0,29
Hf	0,00			0,01		0,00	0,00		0,01			0,00									0,01
Ta		0,00	0,00	0,19	0,00	0,00	0,01		0,16	0,02			0,02		0,01		0,01			0,00	0,02
Bi		0,00		0,00		0,00			0,01							0,00					
Pb	0,31	0,43	0,12	0,81	0,79	0,88	2,89	0,48	1,81	0,98	2,74	1,04	0,45	0,07	0,40	0,48	0,36	0,29	0,94	0,19	0,09
Th			0,00		0,00	0,00	0,00		0,03	0,00			0,00		0,00		0,00	0,00			0,01
U	0,00	0,00		0,01	0,00	0,00	0,00		0,03	0,00			0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00		0,00

### Annexe IV.3: Données individuelles des analyses effectuées au laser ICP-MS dans les carbonates de Bou Azzer en fonction des gisements étudiés

#### Annexe IV.3A : les minéralisations massives - suite

Minéral Type de minéralisations	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	
	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	
Ca (Std interne)	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	
Na	146	126	445	204	461	210	588	124	53	406	137	438	366	274	48	128	70	433	600	20	942	
Mg	1078	1693	1178	1058	1211	1053	1096	2690	1952	2499	825	888	795	862	881	848	623	646	546	529	639	
Al		343	20	26	112	71	93	1102	524	751				2			57	63	1			
Si	1195	1579	1284	1189	1399	1718	2120	2716	2005	2429	1119	1111	1149	1123	1208	990	1729	2113	1266	1132	1033	
K	102	26	110	53	173	59	317	30	11	278	33	373	109	31	13	97	24	289	273	5	709	
Mn	4389	4504	4483	4298	4314	4173	4132	4398	4466	4405	3675	3757	3532	3660	3671	3557	3510	3649	3672	3206	3198	
Fe	1435	2156	1717	1562	1661	1515	1475	2765	2257	2447	1263	1267	1238	1352	1377	1325	993	966	956	677	709	
Li	2,39	1,98	3,33	1,38	5,30	4,55	11,76	4,76	2,20	10,43	0,72	8,84	2,43	0,88	2,25	1,65	8,20	7,75	1,79	18,83	6,78	
B	0,54	0,41	1,21	0,84	1,64	0,83	2,54	0,93	0,37	2,29	0,49	2,34	1,15	0,76	0,38	0,72	0,99	2,75	1,79			
Co	0,03	0,09	0,21	0,08	0,21	3,47	4,02	0,47	0,16	0,17	0,03			0,02	0,02		5,27	4,37	0,03	0,06		
Ni		1,92	1,04		6,33	8,41	12,96	8,29	7,68					0,60			12,54	10,11	0,32	1,20	0,10	
Cu	0,06	0,09	0,13	0,08	0,22	0,77	0,97	0,28	0,17	0,27			0,06			0,10	1,09	0,89				
Zn	3,73	3,93	7,17	4,03	13,40	5,28	24,82	9,93	2,83	13,03	1,84	13,66	5,91	4,72	1,04	5,13	13,52	30,07	22,58	0,98	66,92	
Ga	1,11	0,89	2,08	0,99	2,86	1,23	4,20	1,46	0,63	5,54	0,77	6,64	2,44	0,78	0,21	1,45	0,43	2,81	3,57	0,18	10,97	
Ge	1,10	1,91	1,60	1,52	1,54	1,33	1,77	0,81	1,41	1,65	2,13	2,00	1,95	2,39	3,05	3,06	0,29	0,43	0,49		0,16	
Ag		0,01	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03										0,06	0,10	0,02		0,05	
As	1,93	3,16	3,87	3,28	3,87	41,77	23,36	18,49	4,20	4,47	1,93	2,04	2,10	2,18	2,16	2,00	37,47	28,80	2,59	5,36	4,40	
Sc	3,22	3,47	3,44	4,64	4,79	3,36	2,97	3,52	3,75	3,46	0,53	0,60	0,49	0,48	0,34	0,31	1,74	1,74	2,41	1,17	1,30	
Ti		0,37	0,50		1,19	12,65	29,53	0,82	0,40	0,49				0,22			5,52	6,22				
V	0,20	1,70	0,32	0,26	0,67	0,24	0,17	5,41	2,54	3,65		0,04		0,05			0,08	0,07				
Cr	2,97	87,24	10,94	12,69	38,61	9,55	3,50	333,66	146,70	210,70			0,88	2,52			0,88	1,50			0,80	
Rb	0,52	0,17	0,71	0,35	1,20	0,37	2,15	0,22	0,10	1,81	0,19	2,62	0,71	0,17	0,08	0,56	0,11	1,50	1,52	0,04	4,24	
Sr	187,95	236,58	241,74	237,07	276,53	218,90	304,04	153,73	212,72	298,54	314,06	518,43	355,09	325,77	301,71	328,64	160,74	202,75	233,16	166,54	353,91	
Y	65,58	88,34	94,20	81,76	81,74	69,27	63,48	51,83	72,11	71,25	25,02	27,87	25,22	25,65	20,68	20,61	16,36	16,17	23,71	21,78	23,45	
Zr		0,11	0,02		0,04	0,57	2,13	0,01	0,02					0,01			0,30	0,31				
Nb		0,00	0,00		0,00	0,04	0,10	0,00						0,00			0,04	0,03				
Cs	0,35	0,12	0,51	0,23	0,86	0,23	1,49	0,15	0,06	1,26	0,15	1,81	0,51	0,10	0,04	0,37	0,06	0,91	1,09	0,02	2,69	
Ba	12,07	8,11	24,38	11,20	30,08	13,10	49,56	10,88	4,17	63,25	8,62	99,57	28,59	8,78	2,41	17,54	5,16	33,37	48,14	1,78	161,31	
La	5,20	11,48	9,36	9,09	9,16	11,97	13,87	6,62	10,97	10,67	48,29	46,87	55,67	59,19	75,43	76,16	5,52	4,98	4,68	1,25	1,08	
Ce	25,94	50,62	41,19	41,51	41,16	46,98	50,60	25,35	46,47	45,97	108,85	108,81	125,98	134,32	161,26	160,66	12,50	11,01	11,24	4,88	3,22	
Pr	5,39	9,81	8,31	8,36	8,12	8,67	9,04	4,74	8,80	8,75	15,15	15,30	17,31	18,25	21,25	21,45	1,82	1,70	1,74	0,63	0,56	
Nd	33,41	58,79	50,29	49,68	49,60	49,62	50,33	27,21	50,41	49,94	67,95	67,24	77,12	80,60	89,83	91,88	9,02	8,66	8,67	3,39	3,18	
Sm	19,00	29,21	26,97	24,95	24,71	22,82	21,77	12,68	24,64	24,86	17,01	17,93	19,06	19,78	20,98	21,64	2,67	2,38	3,01	1,55	1,50	
Eu	0,26	0,36	0,36	0,43	0,45	0,32	0,31	0,18	0,34	0,34	0,13	0,16	0,15	0,16	0,17	0,17	0,04	0,04	0,07	0,03	0,03	
Gd	26,74	38,43	38,72	33,32	33,34	28,77	27,13	16,67	31,30	30,86	15,86	16,74	17,27	17,51	17,49	17,96	3,26	2,92	3,76	2,38	2,40	
Tb	3,86	5,45	5,65	4,62	4,61	3,95	3,57	2,50	4,30	4,27	1,77	1,95	1,89	1,95	1,81	1,88	0,42	0,39	0,60	0,48	0,49	
Dy	17,22	24,39	25,64	21,05	20,54	17,93	16,44	12,01	19,14	19,24	7,30	7,95	7,68	7,55	6,77	6,73	2,50	2,36	3,68	3,08	3,53	
Ho	2,36	3,27	3,47	2,91	2,99	2,47	2,29	1,77	2,65	2,65	0,92	1,03	0,91	0,95	0,82	0,80	0,48	0,45	0,69	0,64	0,67	
Er	4,22	5,84	6,14	5,43	5,54	4,54	4,29	3,53	4,74	4,65	1,43	1,64	1,43	1,46	1,23	1,23	1,29	1,17	1,87	1,83	1,97	
Tm	0,39	0,57	0,55	0,53	0,53	0,46	0,43	0,37	0,48	0,44	0,12	0,14	0,13	0,14	0,09	0,10	0,19	0,18	0,25	0,26	0,28	
Yb	2,19	2,95	2,73	3,15	3,00	2,58	2,42	2,22	2,69	2,52	0,61	0,74	0,64	0,64	0,40	0,45	1,27	1,30	1,91	1,79	1,75	
Lu	0,31	0,36	0,34	0,42	0,40	0,35	0,32	0,32	0,37	0,36	0,07	0,08	0,07	0,08	0,05	0,05	0,17	0,20	0,29	0,22	0,23	
Hf		0,00			0,01	0,05											0,01	0,00				
Ta			0,02	0,00	0,01	0,20	0,38	0,00	0,00								0,23	0,21				
Bi					0,04	0,04	0,02	0,01									0,01	0,01				
Pb	0,90	0,62	1,39	0,79	1,78	0,71	2,39	1,92	0,51	3,09	0,45	4,58	1,75	0,92	0,22	1,02	1,13	6,01	5,75	0,18	8,43	
Th			0,00		0,02	0,02	0,03								0,00	0,00	0,02	0,01				
U		0,00			0,02	0,02	0,03	0,00	0,00								0,15	0,03			0,00	

### Annexe IV.3: Données individuelles des analyses effectuées au laser ICP-MS dans les carbonates de Bou Azzer en fonction des gisements étudiés

#### Annexe IV.3A : les minéralisations massives - suite

Minéral Type de minéralisations	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc1	Calc1	Calc1	Calc1	Calc2.2	
	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	
Ca (Std interne)	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	
Na	13	622	11	169	12	4	136	397	180	257	246	757	284	292	138		4	4	2	23	134	
Mg	1129	1182	1333	1272	615	578	631	624	650	515	520	506	1089	1071	566	38	49	367	77	477	1082	
Al				1	47	51	3	15	5						2						329	
Si	1180	1249	1218	1082	1260	1301	1147	1261	1263	1138	1196	1175	1107	1087	1035	959	1334	919	1071	1211	1669	
K	2	93	1	41	2	2	36	115	135	40	72	68	76	113	57			2		6	32	
Mn	4247	4410	4669	4507	3048	2965	3819	3660	3786	3610	3703	3610	4121	4093	3597	809	886	3183	526	2612	2567	
Fe	1682	1727	1933	1807	367	363	966	954	1054	874	881	883	1228	1224	866	94	16330	771	64	662	1045	
Li		2,10		0,84	0,25		0,49	2,30	1,92	1,00	1,42	1,86	2,65	3,77	0,87						2,33	
B	0,22	0,56		0,35	0,37	0,31	1,10	1,48	1,54	0,93	1,23	1,33	1,37	1,40	1,16				0,42		0,65	
Co	0,09			0,05	0,04	0,03	0,05	0,63	0,03	0,02					0,35	1134,77	44990,36	0,05	409,05	0,23	1,33	
Ni	0,73			0,66	0,66		0,96	3,48	1,11					0,97	1,06	2,13	124,63	27934,37	1,42	55,27	13,49	
Cu	0,08	0,05	0,04	0,13	0,73	2,12	0,08	0,26	0,12	0,08	0,08	0,22	0,11	0,10	0,19	0,93	4,32		0,24	0,05	0,35	
Zn	0,54	2,84	0,24	1,59	1,53	1,31	5,35	27,19	10,48	5,22	9,13	10,94	10,14	12,44	6,18		0,62	1,13		3,18	7,16	
Ga	0,09	1,87	0,06	0,97	0,17	0,13	0,82	1,98	1,50	0,98	1,31	1,24	1,30	1,40	1,27			0,09	0,07	0,29	1,19	
Ge	1,64	1,92	1,53	1,68	0,33	1,42	0,48	0,62	0,36	0,29	0,23	0,28	0,13	0,18			0,80		0,36	0,20	0,78	
Ag									0,04	0,02				0,02			0,26	2,26			0,17	
As	3,50	2,61	2,03	2,68	2,02	2,21	2,27	5,40	2,34	1,80	1,93	1,75	2,17	2,13	6,89	8596,68	493827,92		1983,58		10,03	
Sc	2,39	2,49	2,97	3,52	2,11	3,68	2,74	3,17	2,46	2,37	2,29	2,29	0,64	0,59	3,58	0,16	0,53	4,74	1,77	2,05	2,91	
Ti			0,28	0,23			1,76								0,61					0,31	0,91	
V	0,21	0,22	0,28	0,26	0,25	0,24									0,62					0,05	1,91	
Cr	1,47	1,54	1,88	3,19	19,23	17,07	1,16	1,91	2,05	0,89	0,86			0,68					0,99	0,78	117,72	
Rb	0,02	0,69	0,01	0,31	0,03	0,02	0,24	0,67	0,79	0,24	0,46	0,37	0,38	0,61	0,36		0,01		0,19	0,05	0,22	
Sr	231,30	262,49	223,20	227,29	175,03	167,62	171,09	192,94	190,76	158,11	163,38	159,35	239,34	244,26	185,96	67,31	88,35	145,81	201,48	179,49	167,78	
Y	81,45	78,55	94,73	100,78	33,58	56,60	23,61	27,24	20,46	29,64	30,01	30,41	8,84	8,07	27,67	1,97	6,30	41,07	20,28	20,22	26,82	
Zr	0,02							0,04							0,02	0,01				0,28	0,17	
Nb			0,00					0,01							0,00					0,04	0,03	
Cs	0,01	0,48	0,01	0,23	0,01	0,01	0,15	0,45	0,57	0,18	0,28	0,24	0,26	0,41	0,26					0,03	0,13	
Ba	0,67	21,04	0,50	11,08	1,60	0,99	10,44	22,46	15,72	11,80	15,54	15,18	15,19	16,47	17,71	0,11	0,39	0,99	0,22	3,25	12,26	
La	13,88	11,37	11,42	9,91	2,81	10,74	4,73	5,29	4,14	3,00	3,18	2,97	1,96	1,81	2,66	0,64	1,69	1,08	20,90	3,57	4,51	
Ce	53,30	45,55	48,59	45,89	8,81	44,49	13,84	16,51	12,26	8,47	8,59	8,40	5,75	5,40	7,21	0,85	2,79	4,46	21,94	8,96	15,00	
Pr	9,64	8,74	9,50	9,12	1,60	9,20	2,39	2,90	2,13	1,45	1,49	1,47	0,99	0,92	1,30	0,09	0,33	0,90	2,10	1,31	2,85	
Nd	55,29	49,75	56,00	56,74	9,91	51,68	13,62	16,11	11,95	8,61	8,79	5,80	5,22	7,67	0,36	1,32	5,72	7,66	7,11	16,83	16,83	
Sm	26,73	24,99	28,74	30,03	5,28	20,49	5,47	6,45	4,76	4,15	4,06	4,11	2,41	2,02	3,92	0,09	0,38	2,95	1,84	3,26	7,20	
Eu	0,29	0,28	0,28	0,31	0,05	0,15	0,08	0,08	0,07	0,06	0,08	0,06	0,03	0,03	0,05	0,00	0,01	0,02	0,04	0,05	0,07	
Gd	35,16	32,40	39,34	40,10	8,45	22,91	6,82	7,83	5,79	6,07	6,09	6,17	3,07	2,58	5,61	0,12	0,45	4,89	2,07	4,89	9,33	
Tb	5,21	4,85	5,86	6,12	1,52	3,25	0,92	1,05	0,80	0,89	0,91	0,41	0,34	0,86	0,02	0,08	0,83	0,33	0,76	1,23	1,23	
Dy	23,10	22,21	27,03	28,92	7,83	14,68	4,39	5,10	3,82	4,89	4,91	5,03	1,87	1,62	4,67	0,15	0,53	5,29	1,97	4,17	5,94	
Ho	3,11	2,91	3,57	3,90	1,20	2,17	0,68	0,84	0,60	0,88	0,90	0,31	0,29	0,87	0,04	0,14	1,20	0,43	0,67	0,90	0,90	
Er	5,08	5,00	5,61	6,42	2,26	3,93	1,62	2,01	1,38	2,11	2,09	2,20	0,58	0,50	2,15	0,14	0,45	3,56	1,28	1,42	1,88	
Tm	0,43	0,42	0,41	0,50	0,22	0,35	0,20	0,22	0,17	0,26	0,27	0,26	0,06	0,06	0,25	0,17	0,08	0,55	0,20	0,17	0,20	
Yb	2,12	1,89	1,76	2,04	1,31	1,78	1,17	1,54	0,99	1,81	1,60	1,81	0,30	0,27	1,71	0,24	0,67	4,06	1,38	0,87	1,10	
Lu	0,25	0,23	0,21	0,24	0,16	0,23	0,18	0,24	0,16	0,24	0,26	0,25	0,04	0,04	0,25	0,05	0,13	0,63	0,22	0,13	0,17	
HF								0,00														
Ta	0,00			0,00				0,03							0,01							
Bi							0,01	0,01	0,01	0,01				0,00	0,01							
Pb	0,15	0,75	0,06	0,37	0,09	0,06	0,58	1,68	1,55	1,33	1,62	1,60	1,65	1,65	1,26	2,15	17,82	10,55	0,26	1,73	0,26	
Th								0,00							0,00		0,00					
U	0,00			0,00		0,00		0,00		0,00					0,00						0,00	

### Annexe IV.3: Données individuelles des analyses effectuées au laser ICP-MS dans les carbonates de Bou Azzer en fonction des gisements étudiés

#### Annexe IV.3A : les minéralisations massives - suite

Minéral Type de minéralisations	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives		
Ca (Std interne)	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852		
Na	302	168	148	159	370	71	181	93	14	36	48	82	87	20	80	133	239	23	30	129	22	
Mg	4642	9436	3394	3098	3455	1405	3296	1632	1924	1807	1855	1764	2225	2549	1996	1502	1501	1510	1473	1497	1219	
Al	140	601	64	3	13																	
Si	6702	14938	3885	1516	1993	1736	2283	1694	942	731	880	836	763	983	880	935	900	877	811	876	945	
K	187	38	28	50	69	12	58	41	3	6	17	33	23	7	28	27	43	17	9	8	56	3
Mn	3473	3392	3626	3780	3629	3265	3734	3220	3165	3155	3085	2839	2943	3139	2905	2469	2439	2535	2477	2403	2368	
Fe	1581	2374	1309	1237	1287	967	1262	982	1260	1227	1185	1181	1245	1483	1234	927	931	1042	1001	981	915	
Li	7,23	9,18	1,38	1,05	1,77	0,27	1,35	0,87	0,24	0,18	0,23	0,79	0,46		1,00	0,75	0,99	0,20	0,19	1,13		
B	0,96	2,01	1,35	1,63	1,78	0,29	1,34	0,71	0,38	0,37	0,35	0,83	0,83		1,12	0,83	1,05	0,28	0,87	0,22		
Co	0,29	1,71	0,91	0,04		0,33	0,07	0,08			0,09	0,13			0,05	0,08	0,04					
Ni	40,21	124,73	6,85	0,64	1,22		1,17	0,50				0,65			0,90						0,99	
Cu	0,13	0,35	0,77	0,13	0,12	0,12	0,15	0,13	0,06			0,42	0,43	0,07	0,09	0,12	0,12		0,10		0,07	
Zn	7,91	6,64	4,58	3,50	4,80	4,54	4,34	2,68	0,92	0,95	1,29	2,46	1,46	0,93	3,32	2,83	2,20	2,27	0,77	3,21	0,21	
Ga	3,63	1,04	0,64	0,74	1,22	0,79	1,11	0,54	0,23	0,26	0,34	0,46	0,39	0,16	0,77	0,41	0,68	0,28	0,23	0,60	0,16	
Ge	6,51	4,88	1,51	1,81	1,73	0,36	2,02	1,12	0,24	0,28	0,23	1,41	5,58	3,41	1,36	6,68	7,06	9,03	8,00	6,59	3,73	
Ag																						
As	3,09	4,80	5,44	2,47	1,83	1,81	1,99	1,85	0,92	0,83	0,81	1,55	2,10	1,70	2,35	2,20	2,14	2,21	2,09	1,95	1,31	
Sc	1,27	0,44	12,37	12,94	13,94	10,27	8,22	7,28	10,44	5,44	6,74	32,13	1,71	6,66	4,57	1,07	1,06	0,81	1,06	1,07	15,95	
Ti		1,40	0,37				0,31	0,25	0,28						0,41							
V	1,33	3,66	0,22	0,16	0,18	0,11	0,13					0,40	0,27	0,76	0,18	0,06	0,05	0,10			0,06	
Cr	144,22	455,52	93,03	15,01	26,59	1,99	10,41	4,09	1,13	28,56	19,74	5,47	8,72	14,03	6,20	0,69	1,37	2,68	0,98	1,09	0,90	
Rb	1,22	0,17	0,12	0,24	0,33	0,07	0,25	0,19	0,02	0,03	0,08	0,18	0,11	0,05	0,09	0,13	0,19	0,05	0,03	0,25	0,01	
Sr	314,63	247,11	265,69	280,11	285,32	222,52	299,59	247,38	234,90	233,62	215,76	239,29	259,28	310,49	236,55	322,74	338,78	376,25	348,72	331,73	331,75	
Y	140,96	88,54	5,28	5,90	6,68	6,69	2,08	6,25	72,52	27,04	43,27	241,54	62,76	148,92	86,62	41,83	42,25	94,05	93,52	88,27	89,16	
Zr		0,07	0,19			0,01													0,01			
Nb		0,01	0,00				0,00	0,00				0,00							0,00	0,00		
Cs	0,76	0,12	0,07	0,16	0,19	0,06	0,17	0,15	0,01	0,03	0,05	0,09	0,09	0,02	0,09	0,08	0,13	0,03	0,02	0,17	0,01	
Ba	27,33	7,05	4,73	6,41	11,19	6,93	8,15	4,62	3,31	3,79	4,03	5,59	4,70	1,67	8,57	4,82	7,82	1,99	1,32	5,43	0,91	
La	71,59	39,10	35,31	45,26	41,48	8,82	40,67	37,59	2,95	5,41	6,01	22,94	139,59	77,47	36,55	364,27	390,95	416,97	382,63	353,25	153,44	
Ce	163,99	100,32	57,52	73,48	67,84	14,61	68,37	47,06	7,70	13,23	14,42	65,73	326,74	184,45	85,02	628,42	658,71	759,73	700,93	624,54	285,54	
Pr	23,09	15,57	6,78	8,56	8,09	1,82	8,13	4,86	1,26	2,13	2,24	10,84	48,12	28,49	12,29	69,20	71,11	84,98	80,20	74,32	36,25	
Nd	113,61	80,62	27,26	34,57	33,63	7,90	33,01	17,65	6,62	11,07	11,62	61,13	235,47	138,86	59,12	252,55	271,22	350,36	315,21	287,19	150,74	
Sm	33,49	25,61	6,38	7,57	7,88	2,05	6,10	3,20	2,60	3,97	4,10	25,99	51,86	42,11	18,65	38,97	40,20	60,03	52,01	47,81	30,55	
Eu	2,18	1,72	4,62	4,97	5,04	0,58	3,91	1,50	0,15	0,20	0,17	2,36	3,10	3,25	1,39	2,06	2,34	6,14	5,18	4,61	3,02	
Gd	39,04	29,74	5,61	6,61	6,78	2,39	4,41	3,08	4,40	5,20	5,12	43,26	45,65	50,68	23,42	28,42	29,71	50,58	42,16	38,88	28,78	
Tb	5,59	4,04	0,49	0,52	0,58	0,28	0,31	0,31	1,14	0,84	1,00	7,62	4,39	6,69	3,37	2,74	2,89	5,38	4,61	4,33	3,59	
Dy	27,48	19,26	1,62	1,81	1,97	1,35	0,81	1,34	1,17	4,83	6,31	47,26	17,18	33,84	18,23	11,34	11,79	24,22	21,69	20,02	18,36	
Ho	4,57	2,90	0,18	0,21	0,24	0,23	0,09	0,19	2,35	0,92	1,36	8,49	2,21	4,91	2,92	1,40	1,46	3,21	3,14	2,89	2,90	
Er	9,86	5,79	0,27	0,33	0,40	0,49	0,10	0,46	8,38	2,20	4,35	20,60	3,71	9,93	6,37	2,45	2,41	5,71	5,88	5,72	6,41	
Tm	1,09	0,55	0,03	0,03	0,03	0,06	0,01	0,06	1,47	0,31	0,71	2,72	0,31	0,99	0,65	0,20	0,20	0,53	0,61	0,52	0,77	
Yb	6,21	2,66	0,10	0,14	0,15	0,34	0,04	0,39	11,04	2,11	5,09	17,56	1,29	4,74	3,49	0,89	0,91	2,54	2,90	2,59	4,75	
Lu	0,71	0,27	0,01	0,02	0,02	0,05	0,00	0,06	1,55	0,35	0,72	2,45	0,16	0,49	0,33	0,09	0,09	0,24	0,33	0,31	0,72	
Hf		0,01	0,01																			
Ta		0,00	0,00		0,00	0,00		0,01		0,00												
Bi				0,01	0,01										0,01							
Pb	1,66	1,07	0,79		1,33	0,81	0,69	0,59	0,37	0,22	0,24	0,57	0,60	0,30	0,83	0,74	0,58	0,74	0,17	0,47	0,09	
Th	0,00	0,00	0,00			0,00				0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	
U		0,00	0,00					0,00						0,00								0,00



### Annexe IV.3: Données individuelles des analyses effectuées au laser ICP-MS dans les carbonates de Bou Azzer en fonction des gisements étudiés

#### Annexe IV.3A : les minéralisations massives - suite

Minéral	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.
Type de minéralisations	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives
Ca (Std interne)	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852
Na	77	34	59	55	112	18	44	64	111	27	45	23	23	79	76	11	46	23	74	43
Mq	1578	1492	1672	2157	2164	1922	2081	2288	2366	2400	2256	2365	1756	1899	2023	2861	2004	2367	2028	2024
Al	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Si	1061	972	1060	853	1070	837	885	910	984	1058	1087	984	1007	1068	1042	1121	943	954	914	1039
K	21	8	14	18	32	6	12	12	29	11	18	7	7	12	13	3	11	6	21	10
Mn	3126	3020	3014	3287	3289	3051	3120	3319	3429	3423	3341	3338	2949	2979	3182	3483	3105	3308	3128	3093
Fe	1082	1051	1076	1210	1312	1149	1221	1439	1459	1455	1387	1471	1171	1252	1255	1665	1225	1417	1224	1271
Li	0,57	0,42	0,42	0,46	0,70	0,28	0,40	0,20	0,81	0,50	0,36	0,21	0,24	0,42	0,35	0,33	0,32	0,35	0,31	
B	0,69	0,40	0,76	0,64	1,58	1,15	0,49	0,26	5,95	0,52	0,46	0,23	0,63	0,65	0,17	0,52	0,35	1,02	1,27	
Co	0,10	0,10	0,05	0,10	0,09	0,09	0,12	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,05	0,10	0,07	0,07	0,06	0,05	0,05	
Ni	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84
Cu	0,30	0,18	0,26	0,16	0,18	0,15	0,04	0,09	0,22	0,09	0,09	0,09	0,09	0,40	0,13	0,07	0,07	0,11	0,09	
Zn	1,58	1,21	2,46	1,78	2,84	2,44	1,94	1,44	3,30	1,24	1,51	0,70	0,64	2,76	1,62	0,78	2,03	1,13	2,42	
Ga	0,51	0,41	0,71	0,42	0,51	0,44	0,39	0,21	0,32	0,32	0,35	0,09	0,26	0,30	0,73	0,15	0,38	0,34	0,45	
Ge	1,09	0,44	2,03	0,23	3,02	2,60	0,40	5,28	5,14	2,13	1,41	4,26	1,22	1,26	0,89	4,70	0,29	1,34	0,74	
Aq	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	
As	1,16	1,41	1,36	0,92	1,78	2,13	1,38	1,92	2,61	1,35	1,07	1,56	0,99	1,44	1,02	1,62	0,93	1,02	1,11	
Sc	15,39	11,44	16,87	12,12	14,51	14,86	6,09	13,50	13,45	10,57	12,11	11,58	12,71	11,41	8,52	11,84	8,99	6,68	11,58	
Ti	0,65	0,47	0,65	0,65	0,35	0,45	0,04	0,95	0,94	0,40	0,22	0,82	0,34	0,62	0,17	1,18	0,18	0,11	0,41	
V	0,20	0,09	0,26	0,61	0,61	0,45	0,04	0,95	0,94	0,40	0,22	0,82	0,17	0,16	0,17	1,18	0,18	0,11	0,41	
Cr	13,45	11,42	13,42	1,05	19,51	18,18	1,72	31,19	31,07	15,03	7,39	30,94	9,37	13,52	7,13	44,68	3,47	7,01	9,61	
Rb	0,11	0,05	0,08	0,12	0,20	0,04	0,08	0,06	0,15	0,06	0,12	0,04	0,05	0,07	0,06	0,03	0,07	0,04	0,12	
Sr	252,61	224,31	284,17	228,38	295,85	305,42	281,07	387,81	383,54	345,91	315,08	400,51	251,11	249,11	273,45	469,84	232,70	289,87	255,70	
Y	88,18	48,89	125,46	87,13	190,95	175,00	76,73	262,12	285,57	153,17	115,79	216,38	121,92	105,75	83,25	242,69	65,37	117,66	107,13	
Zr	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	
Nb	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Cs	0,08	0,03	0,05	0,09	0,13	0,02	0,04	0,04	0,08	0,03	0,07	0,02	0,03	0,04	0,05	0,01	0,05	0,03	0,08	
Ba	5,66	5,03	9,38	5,39	6,50	5,32	5,33	2,51	4,50	3,17	4,06	1,92	2,91	3,84	9,82	1,67	4,98	6,09	5,39	
La	21,14	7,86	38,04	4,62	58,34	53,48	7,90	101,52	119,46	44,75	23,61	85,58	23,24	23,62	18,92	92,79	3,60	25,84	15,43	
Ce	52,37	19,03	87,98	11,67	140,21	129,06	19,15	242,55	284,98	108,44	59,25	209,64	57,86	57,15	44,46	223,62	8,61	63,99	38,79	
Pr	8,22	3,02	13,63	1,83	22,43	20,54	2,96	39,01	46,53	17,06	9,07	33,21	9,14	8,80	6,84	35,99	1,33	9,83	6,15	
Nd	42,02	16,12	68,44	9,50	114,01	103,04	14,52	194,90	221,18	84,37	45,64	166,14	46,25	45,08	34,01	180,63	6,81	48,70	30,41	
Sm	14,53	5,77	23,14	3,97	40,72	35,67	5,34	65,15	76,64	28,70	16,33	55,28	16,61	15,65	11,42	61,97	2,78	15,63	11,02	
Eu	0,83	0,36	1,32	0,26	2,39	2,11	0,34	4,15	4,57	1,75	0,93	3,55	0,94	0,93	0,72	3,97	0,16	0,97	0,57	
Gd	19,26	8,51	29,46	6,08	49,26	44,92	7,35	80,34	86,88	35,24	19,94	67,88	22,68	20,01	14,73	76,67	4,59	19,81	14,57	
Tb	3,02	1,47	4,52	1,44	7,49	6,79	1,49	11,74	13,15	5,50	3,34	9,99	3,80	3,29	2,42	11,21	1,08	3,18	2,62	
Dy	16,30	8,36	23,42	11,24	39,88	35,64	10,35	58,55	65,12	28,45	19,54	49,50	21,37	18,62	13,78	56,65	8,38	18,88	16,43	
Ho	2,87	1,58	4,05	2,67	6,77	5,96	2,34	9,49	10,36	4,92	3,62	8,08	3,85	3,36	2,73	8,96	2,01	3,68	3,28	
Er	6,99	4,25	9,58	9,24	15,89	13,34	7,39	20,66	21,46	11,90	9,43	17,00	9,03	8,31	7,40	19,30	6,66	10,57	8,99	
Tm	0,88	0,56	1,24	1,55	1,97	1,63	1,05	2,39	2,47	1,46	1,31	1,98	1,15	1,06	1,05	2,14	1,02	1,54	1,24	
Yb	6,16	4,11	8,33	10,92	12,01	10,77	7,37	14,63	14,74	9,50	8,95	11,55	7,23	7,48	7,62	12,82	7,24	10,23	8,48	
Lu	0,89	0,67	1,21	1,57	1,67	1,51	1,08	1,85	1,92	1,35	1,32	1,57	1,07	1,04	1,14	1,65	1,07	1,35	1,25	
Hf	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Ta	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	
Bi	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Pb	0,48	0,32	0,60	0,46	0,76	0,74	0,57	0,44	0,75	0,31	0,32	0,22	0,23	0,48	0,35	0,17	0,49	0,36	0,40	
Th	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
U	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	

### Annexe IV.3: Données individuelles des analyses effectuées au laser ICP-MS dans les carbonates de Bou Azzer en fonction des gisements étudiés

#### Annexe IV.3A : les minéralisations massives - suite

Minéral Type de minéralisations	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives	Calc2.2 Min. massives
Ca (Std interne)	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852
Na	55	56		72	15	1339	32	4	8	48	147	19	10	15	55	5	5	56	74	160
Mg	299	401	2602	2273	2378	12767	1578	2347	1812	6173	1533	1384	1613	1169	1814	1500	1257	1304	1294	1324
Al	26	102		9	151	10895	6	5		81										
Si	1038	1238	949	2587	416	35443	1637	1547	668	8725	1028	973	949	899	846	834	780	1002	1067	1064
K	13	20		13	5	353	10	3	1	18	28	5	1	3	40	2		15	15	45
Mn	3519	3396	4067	3398	5057	112536	3590	3886	3813	3581	3083	2936	3031	2864	3155	3009	2844	2943	2980	2999
Fe	358	443	1930	1362	11568	543551	2802	3997	1219	1695	1010	976	1031	877	1090	1031	922	958	960	1003
Li	0,31	0,53		0,56	1,76	80,65	0,19			2,61	0,76	0,23		0,45	0,63	0,17	0,37	0,34	0,36	0,89
B	0,58	0,50		0,71	4,94	506,75	0,50	0,68		0,70	0,82		0,27	0,26	0,84	0,26		0,41	0,56	0,83
Co	0,08	96,28		0,32	6,60	186,75	1,42	1,15	0,15	0,77	0,05	0,04		0,06	0,11	0,05				
Ni		6,64		12,42	43,22	3262,08	8,54	6,13		1,22	48,23									
Cu		0,14		0,11		5,99	0,45	0,07		0,23	0,18	0,04		0,07				0,11	0,13	0,25
Zn	2,61	4,29	1,57	4,52	925,34	54279,91	54,18	124,27	0,38	3,28	2,46	0,54	0,40	1,22	2,59	1,05		1,59	1,62	4,99
Ga	0,28	0,37	0,35	0,57	9,64	1289,58	0,55	1,20	0,08	0,83	0,40	0,10	0,05	0,38	0,59	0,15	0,14	0,31	0,39	0,66
Ge			19,52	2,46	19,88	15,85	0,95	8,48	4,36	6,14	0,49	0,28	0,86	0,15	1,83	0,18		0,27	0,31	0,27
As		0,27				0,17														
Ag		1027,90	3,50	2,80	42,28	2802,62	2,25	2,85	2,37	3,80	1,18	1,09	1,00	1,16	1,33	0,90	0,70	0,88	0,97	0,97
Sc	7,28	6,53	39,92	6,27	29,21	59,97	9,85	12,23	12,85	1,29	16,85	17,45	16,20	10,32	12,89	20,95	16,05	11,15	12,08	13,12
Ti				0,33	22,13	1584,91	0,90	4,47		0,56			0,32							
V	0,31	0,60	0,73	0,31	41,97	3675,29	2,28	9,75	0,61	0,98	0,04				0,22		0,05		0,06	0,07
Cr	27,97	40,74	10,92	202,00	8483,33	563042,74	497,79	1750,90	6,87	95,55	5,64	10,85	17,57	3,48	17,35	5,17	5,22	5,96	6,14	6,35
Rb	0,08	0,11	0,04	0,08	0,04	2,24	0,08	0,04	0,04	0,12	0,13	0,03	0,01	0,02	0,20	0,01	0,01	0,08	0,08	0,18
Sr	150,65	141,86	559,03	243,27	575,94	1148,42	228,59	282,04	269,98	261,96	208,03	230,85	243,13	205,42	260,64	236,73	216,33	214,40	219,53	230,56
Y	19,62	20,97	272,65	57,75	191,56	184,19	61,33	173,42	205,41	135,23	36,08	34,06	83,00	40,89	96,80	38,29	37,57	36,26	38,27	41,21
Zr				0,03	1,51				0,02	0,01			0,02	0,01	0,01					
Nb				0,02	1,57		0,01	0,01							0,00			0,00		
Cs	0,05	0,10		0,05	0,03	4,23	0,07			0,08	0,09	0,02	0,00	0,02	0,13	0,00	0,00	0,05	0,04	0,15
Ba	3,76	3,60	1,96	3,65	89,20	8606,20	3,01	10,68	0,72	6,18	5,21	1,55	0,81	4,80	6,80	1,90	1,80	4,22	4,99	7,96
La	0,49	0,47	170,11	21,79	371,64	100,71	14,50	47,08	31,58	55,58	7,74	6,08	11,62	2,33	51,96	2,59	2,45	4,91	7,90	10,59
Ce	1,46	1,38	400,63	53,55	698,04	199,04	33,88	142,79	90,30	132,73	19,26	16,05	32,69	5,48	120,54	7,17	6,28	11,93	19,98	25,26
Pr	0,26	0,26	61,70	8,29	87,09	27,82	5,15	25,14	15,51	19,45	3,12	2,80	5,73	0,91	19,36	1,23	1,07	1,94	2,93	3,84
Nd	1,38	1,50	304,02	41,83	373,97	131,59	26,07	137,59	85,75	95,82	15,87	14,99	31,92	5,43	97,73	6,54	6,16	9,89	14,70	18,84
Sm	0,64	0,84	96,28	13,51	86,16	39,75	9,05	48,92	33,36	30,73	5,01	5,17	11,00	2,35	27,67	2,80	2,50	3,87	5,11	6,56
Eu	0,01	0,01	6,39	1,18	5,39	3,92	1,46	2,80	2,38	2,00	0,25	0,20	0,40	0,10	1,53	0,16	0,11	0,24	0,33	0,44
Gd	1,34	1,57	111,59	16,58	87,14	47,37	12,53	62,50	46,40	36,40	6,20	6,39	14,55	4,23	30,83	4,11	3,87	5,56	7,16	8,33
Tb	0,33	0,35	14,17	2,34	10,33	6,83	1,99	8,39	7,41	5,19	0,98	1,01	2,35	0,87	4,02	0,82	0,81	0,98	1,19	1,40
Dy	2,26	2,54	64,53	11,84	46,19	36,19	11,12	40,23	41,19	26,37	5,73	5,91	13,82	5,98	20,01	5,39	5,25	5,91	6,72	7,54
Ho	0,56	0,57	9,40	1,93	6,74	6,38	2,04	6,18	6,88	4,35	1,15	1,11	2,66	1,27	3,21	1,20	1,15	1,13	1,25	1,34
Er	1,87	1,84	18,79	4,19	13,46	14,97	4,73	12,80	16,36	9,44	3,30	2,83	7,00	3,75	7,29	3,73	3,49	3,05	3,07	3,24
Tm	0,31	0,28	2,20	0,49	1,55	1,96	0,62	1,34	1,99	1,03	0,50	0,42	0,94	0,58	0,86	0,61	0,58	0,41	0,45	0,47
Yb	2,34	2,35	13,60	2,93	9,64	13,72	4,05	7,73	12,25	5,70	3,57	3,08	6,60	4,53	5,62	4,88	4,54	3,02	3,08	3,01
Lu	0,40	0,37	1,83	0,41	1,37	2,07	0,66	0,93	1,64	0,67	0,55	0,50	0,98	0,73	0,87	0,84	0,76	0,48	0,47	0,45
HF		0,00				0,05														
Ta						0,01				0,05			0,01							
Bi	0,01	1,93		0,01	0,01	0,15	0,00											0,00		
Pb	0,22	1,09	0,10	0,28	0,12	1,13	0,16	0,10	0,07	0,51	0,60	0,27	0,10	0,15	0,32	0,21	0,04	0,39	0,39	0,81
Th			0,01		0,02	0,33		0,00		0,00	0,00	0,00	0,00		0,01	0,00				
U					0,00	0,33		0,00		0,00				0,00						

### Annexe IV.3: Données individuelles des analyses effectuées au laser ICP-MS dans les carbonates de Bou Azzer en fonction des gisements étudiés

#### Annexe IV.3A : les minéralisations massives - suite

Minéral	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	Calc2.2 Min.	
Type de minéralisations	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	massives	
Ca (Std interne)	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	
Na	756	1		1	66	179	3	21	20	45	79	2	1	5	10	19	16	32	105			
Mg	384	358	333	342	328	338	302	329	364	305	303	338	438	440	574	739	745	766	720	728	780	
Al								56	82				1	59								
Si	1459	1247	1255	1160	1211	1195	1228	1376	1340	1127	1173	1212	1308	1280	1360	1292	1092	1251	1116	1094	1094	
K	112	1			14	208	1	5	4	6	17	1	1	1	3	5	4	7	46			
Mn	4610	4682	4569	4539	4464	4533	4305	4165	4133	4400	4371	4425	4482	4477	4418	4712	3522	3562	3505	3381	3378	
Fe	954	945	897	898	866	893	819	793	821	790	790	938	1263	1273	1339	1614	1198	1184	1177	1169	1222	
Li	1.90				0.28	3.08		0.30	0.33	0.15	0.40				0.16						1.15	
B	0.54				0.16	0.35	0.85	0.18	0.31	1.42	0.28			0.15	0.15	0.24			2.37		0.43	
Co		0.02	0.02		0.04			0.02	0.08	0.07			0.01	0.02	0.08	0.11	0.02	0.06	0.05	0.23	0.12	0.03
Ni					0.97				1.03				0.61	0.56	0.78			1.11		6.57	6.23	0.68
Cu		0.03			0.05		0.17	0.04	0.05	0.04		0.03	0.04	0.06	0.08			0.09	0.09	0.09	0.16	0.03
Zn	9.63	0.27	0.15	0.33	1.37	13.21	0.07	5.53	9.55	0.86	2.08	0.16	0.49	0.55	0.58	0.41	0.94	0.93	2.29	4.08	0.38	
Ga	1.48	0.03	0.03		0.30	3.52	0.06	0.19	0.21	0.24	0.38	0.04		0.02	0.07	0.06	0.17	0.15	0.15	0.62	0.08	
Ge	1.06	1.24	1.10	0.95	1.15	0.82	0.95	0.69	0.73	1.02	1.07	0.91	1.13	1.10	0.85	1.32	2.17	3.33	2.45	2.62	2.55	
Aq	0.04				0.02			0.02			0.01											
As	2.11	2.34	2.22	3.27	2.62	2.36	2.14	2.75	2.99	2.03	2.09	2.22	3.63	3.86	2.01	2.20	2.83	2.94	8.94	8.37	2.49	
Sc	0.21	0.17	0.21	0.23	0.40	0.41	0.29	3.38	3.47	5.35	5.33	8.55	6.47	6.43	5.39	7.00	0.29	0.34	0.31	0.22	0.27	
Ti								0.25	0.21													
V	0.10	0.08	0.05	0.05			0.05	0.69	0.63	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.35	0.09	0.03				0.05	
Cr	0.79	0.67	0.88	0.62	0.83	0.63	0.60	32.49	42.15	0.50	0.89	0.50	0.51	0.73	20.32	0.70	0.51		0.56		0.44	
Rb	0.61	0.01	0.01	0.01	0.08	1.18	0.01	0.03	0.03	0.03	0.08				0.01	0.03	0.03		0.03			
Sr	297.06	253.80	215.76	231.56	217.76	267.07	210.39	160.76	155.06	171.79	173.11	170.89	177.78	178.34	183.24	204.10	253.66	266.99	266.62	272.37	358.03	
Y	95.27	88.77	78.13	82.51	78.05	79.11	74.86	43.16	49.98	48.95	48.55	47.70	58.75	59.05	59.67	69.85	19.78	21.02	20.91	20.44	19.62	
Zr	0.01					0.01		0.00	0.00					0.01	0.01				0.01			
Nb								0.00	0.00					0.00	0.00							
Cs	0.45				0.05	0.81		0.03	0.02	0.02	0.06	0.00	0.00		0.00	0.01	0.02	0.02	0.03	0.20		
Ba	15.74	0.36	0.14	0.13	3.06	41.35	0.54	1.81	1.81	2.46	4.01	0.37	0.09	0.10	0.37	0.65	1.60	1.23	1.53	8.46	0.36	
La	13.63	11.36	7.57	9.21	8.61	9.42	9.19	3.21	3.31	9.15	8.97	6.77	8.76	8.75	6.77	10.34	55.27	88.30	78.01	81.01	69.55	
Ce	34.93	29.78	21.18	25.12	23.91	25.51	25.41	10.98	11.86	30.35	29.95	25.33	32.66	32.52	23.88	39.33	115.28	191.88	162.49	163.85	151.11	
Pr	6.16	5.45	3.94	4.58	4.45	4.73	4.67	2.22	2.51	5.13	5.04	4.45	5.85	5.87	4.32	7.04	14.95	24.70	20.70	21.63	20.26	
Nd	38.59	33.94	24.94	28.52	27.75	29.94	28.86	13.97	17.18	25.90	25.63	23.47	31.00	30.81	23.73	38.71	62.55	102.46	85.88	89.68	86.70	
Sm	13.30	12.06	9.45	10.52	10.04	10.42	10.40	5.47	7.60	6.91	6.85	6.75	9.45	9.40	8.62	14.45	14.24	21.56	19.23	19.69	20.03	
Eu	0.40	0.36	0.29	0.33	0.29	0.33	0.31	0.21	0.29	0.38	0.38	0.34	0.38	0.38	0.31	0.45	0.11	0.16	0.13	0.14	0.16	
Gd	17.82	16.94	13.69	15.27	14.28	15.03	14.12	7.39	10.90	7.53	7.54	7.53	10.30	10.35	10.48	16.90	12.71	17.26	15.91	16.25	16.83	
Tb	2.37	2.20	1.82	2.00	1.84	1.93	1.88	0.96	1.38	1.15	1.12	1.13	1.53	1.53	1.59	2.37	1.46	1.78	1.75	1.75	1.77	
Dv	12.71	11.81	10.07	10.78	10.00	10.42	9.87	5.36	7.18	6.34	6.39	6.48	8.69	8.70	9.06	12.28	5.98	6.75	6.62	6.55	6.51	
Ho	2.43	2.31	2.03	2.14	1.97	2.05	1.94	1.09	1.33	1.24	1.26	1.27	1.61	1.61	1.71	2.11	0.75	0.80	0.78	0.79	0.75	
Er	5.74	5.39	4.83	5.04	4.60	4.89	4.59	2.83	3.23	3.49	3.47	3.40	4.17	4.17	4.39	5.08	1.18	1.31	1.17	1.22	1.15	
Tm	0.58	0.55	0.50	0.52	0.50	0.48	0.47	0.35	0.38	0.51	0.49	0.47	0.54	0.55	0.56	0.63	0.10	0.10	0.11	0.10	0.09	
Yb	2.90	2.63	2.36	2.49	2.42	2.54	2.33	2.13	2.34	3.57	3.47	3.23	3.61	3.60	3.81	4.02	0.42	0.45	0.44	0.45	0.39	
Lu	0.30	0.27	0.25	0.27	0.29	0.25	0.27	0.32	0.33	0.50	0.51	0.49	0.50	0.50	0.54	0.57	0.05	0.06	0.05	0.06	0.05	
Hf		0.00	0.00						0.00													
Ta								0.00														
Bi															0.00							
Pb	2.01	0.07	0.02	0.12	0.47	5.38	0.05	0.52	0.52	0.25	0.48	0.04	0.08	0.08	0.04	0.10	0.23	0.15	0.83	1.42	0.06	
Th			0.00	0.00					0.00					0.00	0.00			0.00	0.00		0.00	
U			0.00	0.00				0.00	0.03			0.00					0.00			0.00	0.00	

### Annexe IV.3: Données individuelles des analyses effectuées au laser ICP-MS dans les carbonates de Bou Azzer en fonction des gisements étudiés

#### Annexe IV.3A : les minéralisations massives - suite

Minéral Type de minéralisations	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2	Calc2.2
	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives	Min. massives
Ca (Std interne)	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852	408852
Na	43	234	107	47	29	57	451	197	57	330	202	54	896	169	9	33	29	26	9	41	66
Mg	656	711	535	576	588	455	604	646	796	590	536	606	949	863	2466	1495	1516	1647	1111	1211	1608
Al				1	5		19	66	193	16		2			8	3					
Si	1238	1363	1226	1253	1193	1264	1318	1349	1718	1205	958	1314	1418	1156	840	1105	1008	1017	711	980	919
K	15	149	17	9	6	15	352	66	28	45	122	17	630	44	2	5	5	7	4	10	24
Mn	3545	3653	3228	3600	3390	3735	3249	3140	2935	3817	3673	3785	4015	3975	3526	2887	2998	3120	2988	2958	3173
Fe	824	904	613	752	831	1021	787	675	660	950	883	953	1228	1267	1529	967	993	1031	924	942	1100
Li	0,27	3,71	0,45	0,27		0,30	7,54	0,86	0,77	0,74	2,43		14,12	0,82		0,26	0,21	0,19			0,45
B	0,98	1,39	0,52	0,37		0,43	1,90	0,81	0,45	1,17	1,08	0,54	5,35	0,57		0,18	0,58				0,81
Co	0,03			0,08	0,08	0,08		0,38	0,43	0,26	0,24	0,13		0,03		0,08	0,03				0,04
Ni				1,06	1,58			2,45	61,83	36,65	24,97	0,87			7,47	13,54					
Cu	0,06	0,12	0,05	0,09		0,06		0,10	0,20	0,09	0,15	0,08	0,11	0,05	22,52	0,07	0,08				0,12
Zn	1,35	7,89	2,67	3,56	1,43	8,81	11,03	3,54	82,46	4,62	6,45	1,98	47,09	6,55	19,61	5,23	1,02	1,15	0,77	1,18	1,66
Ga	0,32	2,05	0,58	0,41	0,24	0,29	4,30	1,72	0,87	1,83	2,19	0,71	7,91	0,92	0,10	0,22	0,13	0,34	0,10	0,12	0,33
Ge	6,63		0,25	0,34	0,28	0,14		0,22		0,59	0,41	0,38	1,11	1,05	2,58	1,38	4,35	5,30	0,16	0,64	1,57
Ag						0,38									0,01						
As	3,50	2,31	2,17	2,44	4,94	2,07	2,11	6,32	60,12	43,35	25,14	3,66	2,26	2,18	1,74	2,31	1,59	1,69	0,77	1,01	1,22
Sc	1,00	1,12	2,62	2,59	1,35	1,59	2,22	1,49	2,04	4,03	3,98	3,38	1,75	1,55	13,89	21,44	5,99	4,78	9,84	8,97	20,24
Ti				0,54						0,37	0,35	0,37									1,80
V	0,05				0,10	0,26	0,15	0,26	0,69	0,12	0,08		0,09	0,05	1,68	0,67	0,16	0,22		0,11	0,09
Cr	0,63		0,56		4,04	51,56	8,75	30,39	52,53	6,65	1,24	0,96		1,13	448,09	10,42	2,70	3,92	1,56	1,25	12,12
Rb	0,09	0,78	0,10	0,05	0,03	0,08	2,18	0,39	0,18	0,31	0,73	0,11	3,04	0,25	0,02	0,05	0,04	0,05	0,03	0,04	0,11
Sr	117,37	171,82	150,04	140,38	174,43	131,79	228,41	177,82	156,22	203,42	207,78	182,55	329,95	206,00	269,69	238,47	238,85	254,21	175,69	202,89	238,12
Y	104,84	22,46	17,77	19,18	17,43	16,30	17,59	14,98	15,38	33,56	32,63	27,31	38,71	35,30	298,95	222,59	88,62	85,96	37,15	41,82	71,23
Zr				0,02		0,01	0,01					0,24			0,01					0,01	0,01
Nb	0,00			0,00		0,00						0,01									0,01
Cs	0,05	0,57	0,07	0,04	0,02	0,06	1,56	0,36	0,16	0,20	0,54	0,09	1,97	0,19	0,00	0,02	0,02	0,01	0,01	0,03	0,08
Ba	3,58	24,24	6,48	4,95	2,62	3,19	50,63	18,17	9,21	21,92	24,73	8,10	92,38	11,46	0,73	2,44	1,91	3,27	0,77	1,42	3,70
La	54,64	1,28	2,75	2,38	1,90	1,43	1,90	2,88	2,14	5,86	5,91	4,84	9,94	10,13	28,08	27,27	101,73	114,58	3,91	10,35	28,89
Ce	204,24	4,48	7,54	6,64	5,72	3,80	6,35	6,81	5,32	18,37	18,27	15,50	32,16	33,18	87,69	66,91	210,09	239,00	9,74	24,56	70,61
Pr	37,75	0,80	1,15	1,16	1,06	0,67	1,16	1,09	0,85	3,16	3,20	2,80	5,70	5,88	16,73	10,76	32,33	36,89	1,53	3,97	10,98
Nd	213,87	4,70	6,15	6,94	5,99	4,01	6,66	5,74	4,76	17,66	17,49	15,51	32,04	33,50	97,00	58,03	161,65	184,83	8,35	20,56	58,02
Sm	81,84	2,18	2,41	3,16	2,42	1,94	2,97	2,15	1,96	6,81	6,94	6,00	12,61	13,01	43,06	24,23	39,64	44,03	3,20	6,65	17,45
Eu	1,55	0,06	0,05	0,04	0,07	0,03	0,06	0,04	0,04	0,15	0,16	0,10	0,11	0,11	4,06	2,19	2,20	2,58	0,20	0,40	0,85
Gd	98,52	3,24	3,32	4,08	3,62	3,02	4,64	3,09	3,06	7,85	7,82	7,19	15,20	15,38	69,68	39,24	38,20	43,38	4,57	8,18	19,67
Tb	10,48	0,57	0,51	0,62	0,55	0,49	0,65	0,45	0,43	1,09	1,05	0,94	1,99	1,85	11,72	7,12	4,29	4,65	0,93	1,32	2,70
Dy	37,92	3,11	2,82	3,32	3,01	2,52	3,11	2,55	2,46	5,56	5,27	4,71	8,94	8,33	64,23	41,79	19,28	20,09	5,84	7,31	13,69
Ho	4,13	0,63	0,52	0,59	0,54	0,46	0,53	0,44	0,44	0,99	0,97	0,83	1,34	1,21	11,05	7,79	2,96	2,94	1,18	1,29	2,29
Er	5,95	1,56	1,36	1,34	1,24	1,16	1,22	1,11	1,07	2,38	2,24	1,82	2,40	2,22	23,70	19,34	6,28	5,87	3,02	3,32	5,43
Tm	0,47	0,22	0,19	0,16	0,15	0,14	0,16	0,13	0,14	0,30	0,30	0,26	0,22	0,21	2,52	2,42	0,72	0,63	0,47	0,45	0,69
Yb	2,28	1,53	1,26	1,08	1,02	0,75	1,04	0,84	0,93	2,23	1,99	1,62	0,91	1,09	14,01	15,41	4,33	3,54	3,62	3,36	4,74
Lu	0,28	0,19	0,21	0,16	0,14	0,12	0,15	0,13	0,14	0,33	0,31	0,24	0,14	0,13	1,71	2,12	0,57	0,48	0,61	0,49	0,74
Hf	0,00									0,00		0,01									
Ta				0,01	0,00			0,00				0,01									0,01
Bi			0,00		0,00			0,01	0,33	0,11	0,07				0,00	0,10	0,00				0,00
Pb	0,27	1,81	0,63	0,56	0,31	0,43	4,13	0,79	1,19	1,22	1,54	0,46	10,71	1,04	0,08	0,16	0,15	0,25	0,06	0,22	0,40
Th								0,00				0,00		0,00			0,00	0,01	0,01	0,00	0,00
U				0,00	0,00	0,00		0,00				0,00		0,00							0,00

### Annexe IV.3: Données individuelles des analyses effectuées au laser ICP-MS dans les carbonates de Bou Azzer en fonction des gisements étudiés

#### Annexe IV.3B : les poches

Minéral Type de minéralisation	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1
	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE
Ca (Std interne)	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597
Na	3	30	4	19	4	2	4	133	68	3	162	15	40	14	63						
Mg	114	114	113	120	94	94	106	123	189	163	80	137	93	95	154	160	97	193	143	135	139
Al									29	45											
Si	469	530	844	758	507	594	752	584	2492	2452	483	591	613	515	636	653	633	860	739	578	713
K		16		5		2		1	13	14					10	50	2	15	5		40
Mn	2562	2515	2517	2515	2455	2490	2475	2617	3092	2010	2084	2571	2554	2659	2710	2733	2711	2708	2745	2614	2645
Fe	265	266	255	272	38	44	64	52	811	1090	20	46	23	22	313	305	239	337	307	280	288
Li				0,37					2,47							0,92		0,43			0,80
B				0,66			0,33		1,09	0,86						0,70					0,68
Co			0,09	0,13	0,10			0,17	13,33	41,00	0,06	0,04									
Ni								0,72	5,34							0,75					
Cu			0,25		0,10	0,20	0,12	0,33	3,93	2,50	0,14	0,16		0,05		0,07					
Zn	0,44	1,47	1,63	7,28	2,64	0,99	0,34	1,34	3,34	3,82	0,21	0,60			1,74	13,67	3,10	1,96	1,99	0,30	4,51
Ga	0,07	0,26	0,60	0,07											0,34	1,96	0,20	0,40	0,09		0,50
Ge																					
Ag									0,05						0,02						
As	0,58	0,35	0,85	8,63	2,21	0,88	0,80	2,55	297,64	1988,19	2,08	1,33	0,54	0,84	0,70	0,98	1,05	1,53	0,94	1,36	0,65
Sc	2,07	2,03	2,00	2,04	1,99	1,28	2,15	2,34	1,99	2,11	4,27	6,04	7,88	8,17	6,93	6,83	2,22	8,32	1,87	3,06	2,99
Ti									4,00	28,12											
V									0,29	0,40											
Cr										4,03				0,05		0,05					
Rb		0,09	0,02	0,02					0,03	0,03					0,96						0,19
Sr	109,84	108,46	105,64	114,13	115,19	102,18	105,60	137,37	186,35	163,63	83,40	181,16	106,51	92,22	152,72	183,56	74,66	184,43	116,49	121,77	130,43
Y	7,56	8,02	7,02	8,88	9,55	4,96	8,44	7,74	9,99	8,84	12,98	18,37	18,03	20,02	17,81	17,71	10,53	24,93	6,46	12,10	11,83
Zr								0,01	0,07	0,06		0,01									
Nb									0,01	0,02									0,00		
Cs	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ba	1	4	14	2	0	0,00	0,01	0,01	0,03	0,06	0,01	0,06	0,01	0,09	0,11	0,13	0,13	0,38	0,02	0,05	0,04
La	0,01	0,02	0,03	0,18	0,02	0,00	0,01	0,01	0,03	0,06	0,01	0,06	0,01	0,09	0,11	0,13	0,13	0,38	0,02	0,05	0,04
Ce	0,06	0,07	0,06	0,19	0,08	0,02	0,05	0,04	0,17	0,15	0,06	0,24	0,03	0,36	0,35	0,36	0,32	1,06	0,06	0,17	0,15
Pr	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,00	0,01	0,01	0,03	0,02	0,02	0,05	0,01	0,07	0,05	0,08	0,06	0,19	0,01	0,03	0,03
Nd	0,09	0,11	0,10	0,21	0,12	0,03	0,09	0,08	0,16	0,17	0,15	0,38	0,10	0,57	0,41	0,47	0,34	1,18	0,09	0,26	0,19
Sm	0,07	0,08	0,07	0,11	0,07	0,01	0,06	0,05	0,10	0,13	0,13	0,20	0,13	0,22	0,24	0,22	0,14	0,38	0,05	0,14	0,11
Eu	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,03	0,00	0,02	0,01	0,01	0,04	0,00	0,01	0,01	0,01
Gd	0,24	0,22	0,15	0,30	0,24	0,15	0,26	0,20	0,24	0,43	0,42	0,69	0,47	0,69	0,68	0,77	0,34	1,13	0,25	0,42	0,37
Tb	0,07	0,07	0,05	0,08	0,07	0,04	0,07	0,05	0,07	0,07	0,11	0,15	0,13	0,15	0,14	0,15	0,08	0,21	0,05	0,10	0,11
Dy	0,63	0,69	0,58	0,76	0,68	0,38	0,64	0,59	0,68	0,66	1,05	1,55	1,36	1,53	1,44	1,41	0,91	2,16	0,49	0,98	0,97
Ho	0,21	0,20	0,18	0,22	0,25	0,12	0,21	0,19	0,20	0,21	0,31	0,48	0,45	0,49	0,44	0,47	0,27	0,68	0,17	0,31	0,30
Er	0,80	0,82	0,65	0,78	0,91	0,50	0,83	0,71	0,76	0,97	1,26	1,74	1,76	1,81	1,67	1,57	1,03	2,19	0,65	1,12	1,08
Tm	0,12	0,12	0,10	0,14	0,15	0,08	0,13	0,12	0,12	0,12	0,18	0,26	0,30	0,30	0,25	0,28	0,17	0,34	0,09	0,18	0,18
Yb	1,05	1,03	1,10	1,06	1,40	0,70	1,03	1,11	1,08	1,03	1,75	2,18	2,54	2,54	1,90	2,02	1,30	2,74	0,77	1,38	1,37
Lu	0,23	0,23	0,22	0,23	0,28	0,17	0,24	0,22	0,26	0,23	0,37	0,48	0,54	0,58	0,47	0,46	0,33	0,62	0,18	0,31	0,32
Hf								0,00		0,01											
Ta	0,00		0,00							0,01											
Bi									0,06	0,29											
Pb	0,08	0,33	0,42	2,93	2,04	0,03	0,02	0,04	0,33	1,23	0,08	0,02	0,00	0,02	0,39	2,98	0,65	0,69	0,35	0,05	0,54
U			0,00						0,00	0,00											
Th				0,00			0,00		0,01	0,01					0,00						

### Annexe IV.3: Données individuelles des analyses effectuées au laser ICP-MS dans les carbonates de Bou Azzer en fonction des gisements étudiés

#### Annexe IV.3B : les poches - suite

Minéral Type de minéralisation	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1
	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE	POCHE
Ca (Std interne)	382597	382597	382597	382597	382597
Na	197	11	17		
Mg	133	124	195	106	115
Al					
Si	578	621	650	692	706
K	68	4	10		
Mn	2623	2777	3053	3355	3484
Fe	279	301	339	179	189
Li	1,54				
B	1,52		0,34		
Co		0,10			
Ni					
Cu	0,09		0,15		
Zn	8,83	0,80	3,48		
Ga	1,40	0,17	0,24		
Ge				0,11	
Ag	0,02				
As	0,52	0,55	2,01	1,16	0,67
Sc	3,04	5,06	10,69	14,71	16,04
Ti					
V					
Cr			0,78		
Rb	0,39	0,03	0,06		0,01
Sr	136,83	106,49	114,92	87,34	87,59
Y	12,68	14,78	20,04	24,11	27,08
Zr		0,01			
Nb					
Cs	0	0	0		
Ba	21	3	4	0	0
La	0,04	0,11	0,08	0,16	0,16
Ce	0,16	0,34	0,29	0,80	0,86
Pr	0,03	0,07	0,06	0,18	0,19
Nd	0,25	0,48	0,37	1,36	1,53
Sm	0,14	0,22	0,22	0,61	0,76
Eu	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Gd	0,47	0,53	0,59	1,28	1,40
Tb	0,11	0,15	0,16	0,21	0,24
Dy	1,01	1,14	1,47	1,63	1,79
Ho	0,31	0,37	0,51	0,49	0,53
Er	1,13	1,32	1,91	1,88	2,05
Tm	0,20	0,20	0,31	0,36	0,40
Yb	1,46	1,56	2,87	3,62	4,16
Lu	0,32	0,40	0,61	0,94	1,09
Hf					
Ta					
Bi					
Pb	1,96	0,26	1,92	0,01	0,01
U					
Th					

**Annexe IV.3: Données individuelles des analyses effectuées au laser ICP-MS dans les carbonates de Bou Azzer en fonction des gisements étudiés**

**Annexe IV.3B : les poches - suite**

Minéral Type de minéralisation	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	
Ca (Std interne)	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	
Na	8	7	8	7	6	5	12	1	1														
Mg	227	221	227	225	205	220	224	221	203	230	212	237	187	201	187	204	202	189	202	189	202	203	196
Al																							
Si	1168	1122	1136	966	1068	1015	1129	1136	1043	1020	814	1014	1481	1087	1069	1092	1062	953	1088	1033	1040		
K	3	12	4	2	10	2	3	2															
Mn	3001	2952	2978	2894	2912	2993	2946	2900	2853	2568	2550	2486	2695	2876	2782	2872	2827	2808	2929	2839	2792		
Fe	399	387	403	380	334	356	368	369	48	47	47	48	57	357	362	368	359	339	385	359	346		
Li																							
B	0,24	0,59	0,22	0,40	0,87	0,65	0,45	0,30			0,23	0,30	0,33	0,31				0,17			0,31	0,17	0,33
Co			0,03	0,07	0,03	0,02	0,11							0,72	0,18	0,02			0,03				0,02
Ni														0,63		0,57					0,40		
Cu	0,07		0,07	0,15	0,04		0,20						1,16	0,19		0,03					0,05	0,06	
Zn	0,84	1,02	0,59	1,29	2,02	0,70	1,11	0,36	0,39	0,14			4,71	1,47	1,18	0,16	0,12	0,34	6,30	1,01	1,50		
Ga	0,08	0,29	0,10	0,17	0,45	0,37	0,22	0,14	0,05				0,04	0,11		0,09	0,06	0,10	1,43	0,05	0,28		
Ge							0,07																
Ag	0,01			0,01										0,02							0,01		
As		0,73	1,42	1,79	1,59	1,54	1,83	1,46	1,34	1,12	1,08	1,25	4,55	2,20	1,60	1,33	1,11	1,25	1,22	1,32	1,18		
Sc	23,75	22,77	23,28	22,22	17,43	20,72	20,03	18,34	6,79	3,05	6,96	8,10	11,23	18,40	17,44	17,97	18,38	18,42	20,68	19,33	19,72		
Ti																							
V	0,07	0,07	0,07	0,05	0,05	0,05	0,06	0,08	0,04					0,04	0,05	0,03	0,05	0,06	0,04	0,06	0,05	0,06	
Cr	0,45	0,65	0,40	0,44	0,54	0,36	0,38	0,38	0,82					0,55			0,34	0,34	0,44	0,40	0,31		
Rb	0,02	0,10	0,03	0,02	0,12	0,02	0,02	0,02					0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,40	0,01	0,05	
Sr	157,80	160,10	157,51	149,22	147,96	153,99	156,36	150,18	147,44	135,67	133,45	131,58	166,69	148,90	141,94	151,66	150,40	142,96	167,76	156,86	147,44		
Y	45,03	42,94	42,67	42,62	34,90	38,26	38,55	38,31	20,68	10,76	22,54	29,72	28,31	35,83	29,04	37,99	36,94	37,45	39,66	39,27	40,08		
Zr																							
Nb								0,00										0,00					
Cs	0,01	0,11	0,02	0,00	0,12	0,01	0,01	0,01							0,01	0,00	0,00	0,00	0,27		0,04		
Ba	0,95	3,43	1,24	2,02	5,16	4,89	2,48	1,47	0,21					0,40	1,06	0,67	0,73	0,75	18,79	0,95	3,54		
La	0,13	0,14	0,13	0,13	0,09	0,11	0,19	0,11	0,00	0,00			0,00	0,22	0,12	0,15	0,09	0,09	0,11	0,09	0,11		
Ce	0,53	0,53	0,47	0,48	0,41	0,43	0,55	0,43	0,04	0,04	0,06	0,06	0,65	0,35	0,37	0,39	0,38	0,43	0,40	0,39	0,43		
Pr	0,11	0,11	0,11	0,11	0,09	0,09	0,10	0,09	0,01	0,01	0,02	0,02	0,12	0,08	0,07	0,09	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09		
Sm	0,46	0,48	0,47	0,46	0,37	0,43	0,49	0,42	0,14	0,08	0,17	0,37	0,41	0,39	0,28	0,42	0,35	0,41	0,41	0,42	0,42		
Eu	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,01	0,00	0,01	0,04	0,02	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03		
Gd	1,51	1,46	1,40	1,41	1,11	1,28	1,26	1,29	0,48	0,24	0,63	1,42	0,88	1,20	0,81	1,28	1,25	1,23	1,28	1,28	1,23		
Tb	0,38	0,37	0,37	0,36	0,28	0,33	0,33	0,33	0,14	0,06	0,17	0,31	0,21	0,31	0,23	0,32	0,31	0,30	0,33	0,37	0,33		
Dy	3,67	3,43	3,41	3,39	2,67	3,11	3,04	2,99	1,41	0,68	1,55	2,88	2,04	2,85	2,32	3,02	2,96	2,88	3,10	3,10	3,10		
Ho	1,20	1,13	1,10	1,10	0,90	1,01	1,01	0,98	0,51	0,25	0,54	1,06	0,67	0,94	0,74	0,98	0,97	1,02	1,03	1,02	1,04		
Er	4,43	4,12	4,08	4,10	3,27	3,84	3,76	3,51	2,00	0,98	2,09	3,42	2,72	3,53	2,98	3,53	3,54	3,74	3,82	3,72	3,82		
Tm	0,70	0,66	0,64	0,65	0,52	0,62	0,57	0,58	0,33	0,17	0,34	0,56	0,45	0,56	0,48	0,60	0,58	0,60	0,61	0,58	0,62		
Yb	5,81	5,44	5,57	5,48	4,51	4,94	4,96	4,76	2,88	1,71	3,36	3,65	4,01	4,65	4,36	4,84	4,70	5,15	4,93	5,17			
Lu	1,30	1,29	1,24	1,22	1,02	1,18	1,12	1,08	0,67	0,42	0,78	0,76	0,95	1,08	0,99	1,09	1,10	1,10	1,18	1,14	1,14		
Hf													0,00										
Ta	0,00												0,00										
Bi					0,00												0,00			0,00			
Pb	0,34	0,56	0,15	0,19	0,82	0,16	0,23	0,10	0,08	0,01	0,02	0,04	0,14	0,09	0,21	0,05	0,04	0,05	1,70	0,21	0,53		
U													0,00										
Th													0,00			0,00							

### Annexe IV.3: Données individuelles des analyses effectuées au laser ICP-MS dans les carbonates de Bou Azzer en fonction des gisements étudiés

#### Annexe IV.3B : les poches - suite

Minéral Type de minéralisation	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	
Ca (Std interne)	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597
Na	2	10		5		53	13	12	1		100	6								
Mg	151	141	143	222	231	203	235	225	227	182	215	218		38	49	32	23	60	23	22
Al								1						0	0					0
Si	579	669	747	1627	1072	1196	1176	289	1172	2581	593	1652	1354	1084	1500	325	1751	1417	1217	
K	6	7		1		2	2	3	1		29	4								
Mn	2858	3006	3231	3849	3917	3637	4012	3954	3932	3622	3888	3937	1789	2235	1411	951	2617	998	1015	
Fe	152	156	157	215	240	210	251	239	244	180	234	234	16	19	17	17	20	15	10	
Li	0,21	0,21									0,49									
B						0,65	0,22	0,19			0,37									0,17
Co				0,35	0,25	0,07	0,13	0,31	0,27	0,05										
Ni							0,44													
Cu			0,06	0,12	0,18	0,11	0,04	0,11				0,05			0,03					
Zn	0,20	0,60		0,34	0,33	0,20	0,32	0,21	0,13		0,70	0,22								
Ga	0,04	0,07		0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,03		0,91	0,13								
Ge				0,41	0,28	0,48	0,43	0,58	0,43	0,26	0,45	0,27			0,21	0,12				
Ag												0,01								
As	0,78	0,58	0,77	3,41	3,57	2,03	2,12	3,17	2,70	1,54	1,42	1,36	1,11	1,32	1,11	1,02	0,99	1,09	0,95	
Sc	10,55	8,26	10,01	18,30	16,39	11,27	13,05	13,12	15,78	4,84	14,98	15,26			0,05				0,06	
Ti						0,25													0,21	
V		0,06			0,05	0,05						0,04								
Cr				0,60	1,02		0,77		0,61											0,77
Rb	0,04	0,04	0,01	0,01		0,01	0,01	0,01			0,17	0,03								
Sr	98,58	103,65	92,84	184,75	226,95	242,99	267,44	271,31	257,87	167,47	253,98	236,40	46,16	53,72	69,48	33,42	62,53	25,21	61,07	
Y	33,63	25,66	30,57	49,30	50,78	44,19	51,40	50,52	46,24	16,09	41,23	39,28	0,11	0,16	3,07	0,56	0,27	0,18	0,06	
Zr						0,01														
Nb		0,00							0,00	0,00					0,00	0,00				
Cs	0,03	0,03				0,00					0,11	0,01								
Ba	0,42	1,57	0,02	0,17	0,15	0,40	0,23	0,24	0,19	0,08	7,53	0,78							0,02	
La	0,67	0,76	0,34	2,56	2,80	3,54	2,55	2,97	3,32	1,48	1,95	1,79	0,01	0,04	2,10	2,52	0,03	0,04	2,64	
Ce	2,47	2,70	1,37	7,52	7,90	7,48	6,68	7,46	8,38	3,85	5,33	5,01	0,02	0,09	3,81	2,80	0,09	0,08	2,22	
Pr	0,47	0,51	0,30	1,35	1,40	1,21	1,20	1,31	1,40	0,68	0,93	0,87	0,00	0,01	0,48	0,28	0,02	0,01	0,22	
Nd	3,48	3,31	2,06	8,24	8,32	7,25	7,27	7,89	8,33	4,13	5,67	5,38	0,03	0,08	2,29	1,23	0,11	0,07	0,88	
Sm	1,20	1,13	0,75	2,56	2,75	2,24	2,50	2,56	2,47	1,11	1,78	1,76	0,01	0,03	0,43	0,13	0,03	0,02	0,06	
Eu	0,05	0,04	0,03	0,09	0,08	0,11	0,08	0,08	0,07	0,02	0,04	0,04			0,00	0,00				
Gd	2,13	1,80	1,49	3,74	3,89	3,24	3,67	3,73	3,35	1,38	2,68	2,60	0,02	0,02	0,47	0,10	0,04	0,03	0,04	
Tb	0,31	0,24	0,23	0,52	0,56	0,50	0,56	0,55	0,48	0,18	0,41	0,39	0,00	0,00	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00	
Dy	2,28	1,76	1,94	3,44	3,64	3,26	3,73	3,63	3,32	1,18	2,75	2,71	0,01	0,01	0,25	0,04	0,03	0,02	0,01	
Ho	0,66	0,50	0,61	0,98	1,05	0,91	1,07	1,04	0,92	0,33	0,79	0,78	0,00	0,00	0,05	0,01	0,01	0,00	0,00	
Er	2,51	1,77	2,39	3,75	3,88	3,31	3,89	3,70	3,53	1,26	3,02	2,99	0,01	0,01	0,18	0,04	0,02	0,01	0,01	
Tm	0,44	0,33	0,45	0,64	0,68	0,56	0,68	0,63	0,61	0,19	0,54	0,53	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	
Yb	4,41	3,39	4,35	6,34	6,58	5,26	6,29	6,02	5,97	1,86	5,31	5,28	0,01		0,11	0,03	0,01	0,01	0,01	
Lu	1,12	0,85	1,05	1,54	1,57	1,25	1,42	1,41	1,44	0,46	1,28	1,29	0,00		0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	
Hf								0,00			0,00									
Ta										0,00										
Bi									0,01	0,00									0,00	
Pb	0,09	0,15	0,01	0,02	0,03	0,02	0,02	0,04	0,03	0,01	0,32	0,07					0,00			
U								0,00												
Th				0,00		0,00		0,00	0,00											





### Annexe IV.3: Données individuelles des analyses effectuées au laser ICP-MS dans les carbonates de Bou Azzer en fonction des gisements étudiés

#### Annexe IV.3B : les poches - suite

Minéral Type de minéralisation	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE	Calc 4.2 POCHE
Ca (Std interne)	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597	382597
Na	13	3	15	39	17	123	2	10										
Mg	208	222	223	216	122	41	136	65	120	122	146	112	120	129	159	130	115	134
Al	1						16											
Si	951	1038	1081	999	649	458	1784	708	643	570	676	768	612	619	716	645	622	634
K	4	5	7	23	2	20	7	24										
Mn	2938	2990	2948	2958	3296	2612	2778	2436	2941	2900	3058	2880	2917	2908	3087	2906	2821	2822
Fe	355	391	383	388	167	109	493	96	312	300	327	263	277	308	166	145	137	147
Li				0,28	0,22				0,30	0,42								
B	0,24	0,20		0,35			3,73		0,34									
Co	0,06	0,07		0,02	0,04		2,13		0,07	0,09					0,04	0,15		0,15
Ni							7,36											
Cu	0,27	0,14					4,77											0,07
Zn	1,51	1,65	1,40	2,15	0,24	0,18			0,96	2,47			0,19					0,86
Ga	0,14	0,13	0,23	0,48			0,73		0,31	0,41			0,04					0,49
Ge					0,09										0,09			
Ag																		
As	1,49	1,76	1,04	1,20	0,89	0,99	56,04	0,87	0,92	0,93	0,56	0,60	0,45	0,63	0,66	1,96	0,75	3,04
Sc	21,23	23,92	22,97	22,75	20,73	2,73	2,26	0,77	14,86	14,61	15,37	3,94	3,66	14,34	9,20	5,81	5,55	7,11
Ti		0,18		0,26			5,49		0,34									
V	0,05	0,11	0,05	0,05														0,04
Cr				0,55		1,37	12,37											0,67
Rb	0,02	0,04	0,05	0,15	0,01				0,06	0,17					1,19			
Sr	143,82	151,93	161,01	154,75	91,50	108,09	123,70	94,47	125,46	127,96	131,99	98,13	101,74	124,02	123,38	102,98	92,74	104,42
Y	41,88	43,41	43,59	41,96	28,44	2,32	3,83	1,59	28,81	28,30	33,82	7,47	11,97	29,51	35,27	22,63	19,67	24,29
Zr	0,01	0,00		0,01											0,01			
Nb				0,00					0,00						0,00	0,00		0,00
Cs	0,01	0,03	0,04	0,09			0,08		0,03	0,12								
Ba	1,40	1,58	3,10	5,81	0,46	0,47	5,10	0,08	4,89	5,21	0,05	0,17	0,11	0,04		0,26	0,04	0,26
La	0,12	0,12	0,24	0,12	0,45		0,01	0,04	0,04	0,05	0,01	0,01	0,01	0,05	1,66	0,43	0,26	0,78
Ce	0,46	0,46	0,69	0,47	1,55	0,00	0,02	0,01	0,17	0,16	0,19	0,03	0,06	0,19	4,96	1,60	1,04	2,61
Pr	0,10	0,09	0,13	0,09	0,30	0,00		0,00	0,04	0,03	0,04	0,01	0,02	0,04	0,91	0,32	0,21	0,50
Nd	0,75	0,68	0,89	0,76	2,07		0,01	0,01	0,28	0,29	0,34	0,06	0,12	0,33	5,73	2,10	1,44	3,21
Sm	0,41	0,42	0,50	0,44	0,85	0,01			0,24	0,21	0,25	0,04	0,10	0,23	1,77	0,80	0,56	1,08
Eu	0,03	0,04	0,05	0,04	0,03				0,01	0,02	0,02	0,00	0,01	0,02	0,06	0,02	0,02	0,03
Gd	1,32	1,36	1,48	1,40	1,45	0,01	0,14	0,02	0,70	0,75	0,92	0,19	0,36	0,76	2,74	1,30	1,04	1,65
Tb	0,34	0,36	0,37	0,36	0,24	0,01	0,03	0,01	0,20	0,20	0,25	0,06	0,10	0,23	0,37	0,20	0,17	0,25
Dy	3,22	3,39	3,61	3,38	1,82	0,09	0,38	0,08	2,32	2,30	2,62	0,54	0,94	2,37	2,52	1,51	1,30	1,75
Ho	1,08	1,13	1,16	1,07	0,55	0,05	0,05	0,04	0,75	0,76	0,86	0,20	0,32	0,76	0,70	0,42	0,37	0,50
Er	3,86	4,16	4,17	4,10	2,26	0,23	0,38	0,17	2,92	2,87	3,20	0,73	1,21	2,87	2,54	1,69	1,47	1,80
Tm	0,62	0,66	0,65	0,65	0,47	0,07	0,09	0,04	0,50	0,51	0,56	0,12	0,20	0,49	0,46	0,30	0,26	0,31
Yb	5,25	5,62	5,50	5,37	5,26	0,79	0,67	0,33	4,47	4,55	5,16	1,08	1,58	4,33	4,23	2,82	2,71	3,10
Lu	1,23	1,26	1,24	1,24	1,46	0,26	0,17	0,09	0,98	1,01	1,19	0,24	0,36	0,95	1,06	0,69	0,63	0,78
Hf														0,00				
Ta	0,00																	
Bi																		0,00
Pb	0,15	0,42	0,34	0,54	0,04	0,05	0,72	0,02	0,31	0,64	0,01	0,15	0,01	0,01	0,01	0,14	0,01	0,03
U				0,00														
Th		0,00			0,00													

### Annexe IV.3: Données individuelles des analyses effectuées au laser ICP-MS dans les carbonates de Bou Azzer en fonction des gisements étudiés

#### Annexe IV.3C : les veines

Minéral	Calc 3	Calc 3	Calc 3	Calc 3	Calc 3	Calc 3	Calc 3	Calc 3	Calc 3	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1	Calc 4.1		
Type de minéralisation	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	
Ca (Std interne)	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	
Na		3	8		666		3	69				3	58		1	6							
Mg	608	2543	16374	2403	257088	500	11121	1609	217	218	221	218	229	212	209	213	209	212	406	271	235		
Al			6		267		3	2															
Si	880	902	1085	841	3159	807	1289	897	772	911	844	905	765	735	888	894	841	866	983	916	915		
K					187		2	10				1	6								1		
Mn	5172	10493	11164	10617	12800	4538	7905	3097	1488	1477	1477	1474	1809	1625	1599	1570	1513	1492	1842	1526	1634		
Fe	200	780	2139	920	31208	144	1766	2031	367	371	371	374	417	371	361	367	363	364	605	448	434		
Li					2																		
B					2,20														0,16				
Co				0,09	0,19						0,26					0,05	0,07	0,06					0,09
Ni																							
Cu					1,44											0,03	0,04						0,05
Zn			0,33		3,39			0,47							0,21	0,10	0,41						0,24
Ga					0,21			0,14															
Ge	6,55		0,94	0,38	0,47	8,32	1,34	1,44	0,21	0,10	0,17	0,13	0,22	0,11	0,14	0,14	0,17	0,18	0,42	0,11	0,18		
Ag																							
As	1,97	0,55	5,01	0,75	1,71	1,87	0,95	1,73	0,55	0,73	0,61	0,55	0,53	0,65	2,24	1,14	2,65	0,59	0,58	0,49	1,56		
Sc	13,36	13,10	20,21	38,63	4,76	16,33	76,90	162,46	6,08	6,08	6,16	6,18	8,40	6,03	5,83	5,76	5,73	5,76	4,16	2,23	8,48		
Ti					3,09																		
V	0,15	1,20	0,64	1,01	0,90			0,26	55,97														
Cr								1,68	9,73						0,55								0,73
Rb					0,22			0,02	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01		0,00		0,63	0,01	0,01	0,00	
Sr	62,65	92,02	72,44	100,10	31,58	102,68	109,10	67,38	123,98	123,90	125,70	127,91	147,47	134,26	129,62	127,69	124,94	123,56	206,64	151,33	153,06		
Y	35,31	2,47	23,05	29,46	31,42	53,28	113,24	58,78	55,92	55,52									30,02	16,09	59,76		
Zr			0,03																				0,01
Nb				0,00				0,00															
Cs					0,06							0,00	0,01		0,00								
Ba	0,09		0,08	0,07	1,44		0,28	1,58	0,05	0,05	0,06	0,26	0,08	0,06	0,08	0,18	0,04	0,04	0,24	0,18	0,06		
La	284,84	0,53	25,67	10,11	9,15	349,55	43,56	55,71	0,47	0,49	0,50	0,53	0,58	0,75	0,73	0,50	0,44	0,44	5,70	0,29	0,40		
Ce	594,41	1,49	57,56	26,34	21,51	709,60	116,70	115,33	3,13	3,19	3,27	3,25	3,20	3,77	3,60	2,92	2,82	2,86	15,98	1,55	2,60		
Pr	74,45	0,22	7,94	3,75	3,03	91,12	16,47	15,85	0,71	0,75	0,75	0,76	0,74	0,81	0,78	0,69	0,66	0,69	2,52	0,32	0,65		
Nd	313,39	1,19	35,35	17,70	14,08	399,96	78,21	73,89	5,32	5,31	5,42	5,43	5,59	5,87	5,36	4,96	4,82	4,98	14,02	2,29	4,81		
Sm	50,41	0,42	8,83	6,25	4,78	74,20	28,37	22,15	2,52	2,54	2,57	2,71	2,97	2,73	2,55	2,42	2,35	2,52	3,52	0,97	2,85		
Eu	1,66	0,02	0,36	0,39	0,45	3,11	1,48	2,73	0,11	0,11	0,13	0,12	0,14	0,11	0,11	0,10	0,10	0,11	0,14	0,04	0,13		
Gd	28,01	0,61	8,44	8,68	6,36	45,80	38,65	23,92	5,37	5,22	5,31	5,39	6,07	5,34	5,22	4,92	5,05	5,21	5,13	1,79	5,90		
Tb	2,39	0,09	1,06	1,19	1,03	3,72	5,13	2,95	0,86	0,85	0,84	0,86	1,04	0,87	0,83	0,81	0,85	0,84	0,66	0,27	1,00		
Dy	9,04	0,53	5,02	5,79	6,05	13,85	25,03	13,72	5,70	5,65	5,82	5,73	7,12	5,85	5,42	5,52	5,64	5,62	3,81	1,74	6,88		
Ho	1,21	0,08	0,76	0,85	1,10	1,66	3,40	2,06	1,38	1,38	1,39	1,37	1,68	1,39	1,32	1,33	1,32	1,37	0,84	0,41	1,56		
Er	2,40	0,14	1,57	1,71	2,45	3,42	6,71	4,41	4,28	4,33	4,37	4,36	5,32	4,42	4,19	4,14	4,21	4,40	2,29	1,23	4,82		
Tm	0,31	0,02	0,21	0,19	0,36	0,40	0,74	0,49	0,64	0,66	0,66	0,65	0,77	0,67	0,63	0,64	0,65	0,66	0,31	0,18	0,72		
Yb	2,21	0,13	1,38	1,14	2,42	2,86	5,21	2,72	4,84	4,85	4,93	4,72	5,78	5,06	4,88	4,77	4,94	4,97	2,04	1,36	5,24		
Lu	0,33	0,01	0,19	0,14	0,36	0,42	0,66	0,36	0,92	0,91	0,89	0,88	0,97	0,92	0,90	0,91	0,92	0,91	0,33	0,25	0,94		
Hf					0,01											0,00							
Ta																							
Bi								0,01															
Pb	0,02	0,01	0,02		0,39	0,02	0,01	0,12	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,10	0,08	0,12	0,02	0,03	0,03	0,13		
U	0,05	0,00	0,03	0,01	0,04	0,05	0,01	0,02															
Th			0,00		0,00	0,00		0,00	0,00	0,00			0,00	0,00				0,00	0,00	0,00			

### Annexe IV.3: Données individuelles des analyses effectuées au laser ICP-MS dans les carbonates de Bou Azzer en fonction des gisements étudiés

#### Annexe IV.3C : les veines

Minéral	Calc4.2	Calc4.2	Calc4.2	Calc4.1	Calc4.1	Calc4.1	Calc4.1	Calc4.1	Calc4.1	Calc4.1	Calc4.1	Calc4.1	Calc4.1	Calc4.1	Calc4.1	Calc4.2	Calc4.2	Calc4.2	Calc4.2	Calc4.2	Calc4.2
Type de minéralisation	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines
Ca (Std interne)	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767
Na	1	217	219	227	1513	335	247	112	247	159	53	126	1061	1057	211	454	16	236	253	178	1
Mg																					
Al																					
Si	884	987	957	923	1032	965	1052	1027	1102	943	1258	1039	1160	1171	910	1000	1598	1573	933	816	830
K																					
Mn	1448	1444	1477	1980	1634	1638	2185	2165	2022	2329	2315	2422	2600	2572	2464	3630	4221	3900	1431	1407	1399
Fe	379	380	398	1662	591	570	1010	1037	1270	1124	1094	1018	1982	1887	1599	568	713	591	375	373	374
Li																					
B																					
Co																					
Ni																					
Cu																					
Zn																					
Ga																					
Ge																					
Aq																					
As	1,39	0,53	0,52	0,64	0,42	0,41	0,88	0,69	0,51	0,82	0,95	0,07	1,29	1,24	0,61	2,57	4,96	0,46	0,44	1,09	
Sc	6,24	6,11	6,69	19,82	0,98	0,97	4,64	4,34	3,65	14,10	12,31	11,88	2,80	2,54	5,93	2,25	5,00	1,52	6,32	5,28	
Ti																					
V																					
Cr																					
Rb																					
Sr	132,95	130,97	131,53	179,27	146,63	148,24	190,49	197,47	195,86	178,19	188,32	195,44	211,18	229,40	196,67	178,97	193,38	182,73	128,05	127,81	128,04
Y	50,78	48,78	51,02	123,20	2,71	3,15	17,71	17,76	32,95	68,22	62,87	61,04	66,15	66,61	61,33	21,28	55,91	21,58	54,43	48,86	13,45
Zr																					
Nb																					
Cs																					
Ba	0,12	0,04	0,03	0,10	2,21	2,01	7,52	13,54	3,34	2,05	5,83	11,42	5,87	14,88	1,49	11,66	7,47	14,68	0,12	0,08	
La	0,50	0,47	0,52	6,15	0,37	0,39	6,41	6,73	4,79	11,29	10,24	9,87	13,28	13,40	11,49	4,26	9,33	5,29	0,52	0,53	
Ce	3,32	3,12	3,34	29,59	0,92	1,03	20,31	21,26	19,73	46,60	43,55	42,22	54,02	55,11	47,79	10,27	25,07	14,04	3,36	3,20	
Pr	0,77	0,72	0,76	5,72	0,16	0,17	3,42	3,64	3,59	8,64	8,00	7,84	10,20	10,31	9,25	1,71	4,41	2,50	0,79	0,71	
Nd	5,26	5,19	5,40	34,79	0,87	1,03	19,54	20,32	21,86	49,98	45,63	44,74	60,23	61,60	55,32	9,33	25,46	13,51	5,64	5,27	
Sm	2,37	2,45	2,46	18,22	0,30	0,39	7,57	7,76	9,67	21,58	19,47	19,66	26,58	26,57	24,83	2,99	8,16	4,18	2,63	2,39	
Eu	0,11	0,11	0,10	0,56	0,02	0,03	0,18	0,17	0,25	0,26	0,25	0,54	0,53	0,55	0,09	0,21	0,12	0,12	0,11	0,02	
Gd	4,84	4,72	4,95	27,94	0,55	0,62	8,43	8,90	12,83	25,77	23,47	23,82	33,39	34,00	31,50	3,95	10,39	5,00	5,34	4,78	
Tb	0,78	0,74	0,78	4,53	0,07	0,09	0,97	0,98	1,64	3,30	3,00	2,91	4,08	4,12	3,74	0,57	1,50	0,67	0,84	0,75	
Dy	5,20	5,00	5,25	25,57	0,40	0,52	4,28	4,37	7,87	16,07	14,46	14,50	18,54	18,59	16,35	3,27	8,33	3,36	5,56	5,01	
Ho	1,24	1,20	1,28	4,28	0,10	0,12	0,62	0,63	1,18	2,43	2,16	2,16	2,47	2,55	2,30	0,63	1,69	0,66	1,33	1,23	
Er	3,88	3,84	4,01	9,93	0,32	0,38	1,34	1,40	2,54	5,44	4,80	4,73	5,12	5,02	4,88	1,67	4,42	1,57	4,28	3,76	
Tm	0,60	0,59	0,62	1,20	0,03	0,05	0,16	0,16	0,26	0,62	0,57	0,57	0,50	0,52	0,55	0,22	0,54	0,21	0,64	0,55	
Yb	4,47	4,24	4,48	7,26	0,39	0,41	1,08	1,03	1,63	3,62	3,15	3,12	2,50	2,55	3,06	1,49	3,07	1,20	4,71	4,28	
Lu	0,82	0,79	0,84	0,94	0,08	0,07	0,14	0,15	0,20	0,49	0,42	0,42	0,29	0,30	0,41	0,22	0,40	0,15	0,86	0,80	
Hf																					
Ta																					
Bi																					
Pb	0,03	0,02	0,02	0,02	0,07	0,07	1,97	2,44	0,48	1,61	2,21	2,46	1,69	2,52	0,13	1,78	1,05	2,82	0,02	0,02	
U																					
Th																					

### Annexe IV.3: Données individuelles des analyses effectuées au laser ICP-MS dans les carbonates de Bou Azzer en fonction des gisements étudiés

#### Annexe IV.3C : les veines - suite

Minéral	Calc4.2	Calc4.2	Calc4.2	Calc4.2	Calc4.2	Calc4.2	Calc4.2	Calc4.2	Calc4.2	Calc4.2	Calc4.2	Calc4.2	Calc4.2	Calc4.2	Calc4.2	Calc4.2	Calc4.2	Calc4.2	Calc4.2	Calc4.2	Calc4.2	Calc4.2
Type de minéralisation	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines large	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines
Ca (Std interne)	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767
Na	1		1	3	0	44		569	41	84	2	47	538	3062	8	8	46	220	21	113	37	
Mg	227	224	221	222	222	223	217	561	542	542	4030	1152	1769	11077	920	1087	1095	1164	651	599	483	
Al											87	111	763	1515							0	
Si	925	943	810	809	812	868	892	832	880	706	1639	483	16986	747	1357	1413	656	1643	1448	1440		
K			1	1		11		118	21	54	1	24	351	517	7	3	22	97	7	44	3	
Mn	1476	1482	1461	1461	1486	1482	1469	4297	3607	3709	12085	3938	4123	4418	4468	4494	4477	4513	4276	3903	3601	
Fe	402	393	393	394	400	404	388	595	579	592	1694	985	1540	3943	849	938	937	940	697	655	542	
Li						0,19		2,62	0,23	0,83		0,36	3,44	9,17	0,16	0,41	1,69	0,13	1,04	0,25		
B			0,17					3,04	0,51	0,83	0,22	1,54	32,92	304,62	0,28	0,15	0,33	0,91	0,28	0,78	0,21	
Co								0,03			0,22	3,91	78,34	1633,90			0,28		0,07	0,09	0,05	
Ni											0,34	0,57	9,40	97,72	0,04	0,04	0,05	0,07	0,29	0,17	0,05	
Cu	0,03							0,54	0,09		0,20	0,57	9,40	97,72	0,04	0,04	0,05	0,07	0,29	0,17	0,05	
Zn			0,11			0,88		15,69	2,24	4,89	6,89	1,30	6,80	114,18	1,10	0,33	2,39	10,09	2,08	6,22	1,21	
Ga						0,08		4,58	0,53	1,23	0,68	0,23	0,98	5,07	0,39	0,15	0,50	2,33	0,22	0,85	0,13	
Ge	0,16	0,08	0,22	0,14	0,11	0,20	0,18	1,60	0,40	0,39	0,09	0,09	7,38	7,69	10,99	6,73	8,79	9,11	8,99	0,18	0,20	0,20
Ag												0,04	1,68	1,83					0,02	0,01		
As	0,47	0,41	0,60	0,40	0,41	0,48	0,37	2,85	2,07	1,94	4,62	28,75	749,26	13609,83	2,86	3,31	3,23	3,21	2,58	2,16	2,39	
Sc	6,74	6,91	6,75	6,62	6,50	6,56	6,57	2,22	5,59	5,59		4,82	6,70	10,95	6,30	5,61	5,51	5,61	2,38	2,84	3,37	
Ti				0,35				0,25				0,63	17,92	87,10	0,15	0,16	0,25	0,25			0,20	
V								0,24	0,06	0,06		1,72	3,59	9,16	0,93	1,19	1,22	1,21				
Cr	0,66	0,60					0,53	0,51	0,57	0,74	0,63	4,04	22,58	416,02	0,48	0,50	0,60	0,40	0,53	0,59		
Rb	0,01		0,01	0,01	0,01	0,04	0,01	0,69	0,11	0,23	0,01	0,08	1,47	3,96	0,06	0,03	0,15	0,67	0,03	0,24	0,02	
Sr	130,94	131,86	129,92	132,31	132,24	130,24	128,47	227,38	153,92	164,53	260,67	328,07	440,39	514,41	319,26	368,73	377,57	447,15	166,52	164,83	143,45	
Y	50,98	52,13	52,63	54,36	54,86	54,64	55,83	52,38	33,48	33,98	3,68	156,13	171,78	164,11	132,78	155,82	156,93	156,06	8,38	10,71	24,51	
Zr		0,00						0,01			0,01		1,37	0,00	0,01	0,01	0,01			0,01		
Nb								0,00					0,48		0,00	0,00						
Cs						0,02		0,53	0,07	0,19	0,03	0,01	0,79	0,45	0,03	0,01	0,09	0,42	0,02	0,17	0,01	
Ba	0,12	0,05	0,19	0,14	0,06	1,16	0,08	43,59	4,55	10,22	6,16	1,32	7,12	40,09	3,07	0,81	4,48	19,26	2,27	7,20	1,28	
La	0,53	0,56	0,54	0,57	0,58	0,55	0,53	11,85	0,91	0,89	0,39	58,10	66,84	68,15	51,96	68,23	72,59	68,42	1,02	1,08	0,64	
Ce	3,37	3,44	3,46	3,56	3,58	3,53	3,47	31,21	3,67	3,62	0,77	147,19	170,90	167,93	130,31	171,83	176,37	170,75	3,10	3,08	2,58	
Pr	0,76	0,79	0,81	0,81	0,79	0,79	0,81	5,39	0,78	0,76	0,13	24,62	27,38	30,24	21,94	28,85	29,40	28,98	0,55	0,57	0,55	
Nd	5,43	5,72	5,62	5,85	5,91	5,64	5,74	31,20	5,40	5,14	0,68	137,64	150,31	146,77	120,36	159,85	161,20	160,54	3,02	3,29	3,56	
Sm	2,59	2,60	2,57	2,68	2,66	2,73	2,71	9,88	2,75	2,62	0,21	38,68	40,26	40,19	34,15	44,84	45,13	44,19	1,07	1,17	2,00	
Eu	0,11	0,11	0,11	0,13	0,12	0,14	0,11	0,24	0,09	0,09	1,59	1,18	1,32	1,24	1,03	1,35	1,35	1,38	0,04	0,05	0,07	
Gd	4,98	5,25	5,16	5,34	5,34	5,27	5,42	11,77	4,55	4,60	0,42	44,12	44,82	44,74	38,20	48,94	49,18	48,51	1,29	1,65	3,15	
Tb	0,80	0,81	0,81	0,83	0,86	0,86	0,87	1,56	0,79	0,77	0,05	5,33	5,27	5,40	4,65	5,92	5,84	5,88	0,21	0,28	0,56	
Dy	5,23	5,46	5,40	5,51	5,63	5,54	5,60	8,51	4,83	4,83	0,29	26,27	28,18	26,47	23,85	30,05	29,94	29,74	1,24	1,58	3,37	
Ho	1,26	1,31	1,34	1,35	1,37	1,35	1,38	1,60	1,01	1,05	0,06	4,84	4,57	5,06	4,42	5,39	5,36	5,36	0,25	0,33	0,70	
Er	4,01	3,99	4,22	4,14	4,28	4,13	4,28	4,05	2,84	2,71	0,13	10,94	11,82	10,11	10,76	12,58	12,44	12,32	0,69	0,92	1,93	
Tm	0,59	0,63	0,61	0,63	0,64	0,67	0,65	0,47	0,41	0,40	0,01	1,19	1,27	1,35	1,24	1,37	1,33	1,35	0,10	0,14	0,31	
Yb	4,40	4,50	4,74	4,74	4,68	4,75	4,77	2,65	2,79	2,71	0,04	5,92	5,57	5,02	6,78	7,06	7,29	7,13	0,69	0,95	2,23	
Lu	0,81	0,87	0,87	0,86	0,87	0,87	0,88	0,33	0,44	0,43	0,01	0,73	0,72	0,41	0,85	0,86	0,86	0,89	0,10	0,15	0,36	
Hf								0,00								0,00					0,00	
Ta																						
Bi								0,00				0,04	0,14	4,39							0,00	
Pb	0,02	0,01	0,05	0,03	0,02	0,23	0,02	5,37	0,47	1,23	2,33	0,34	1,53	13,90	0,38	0,12	0,68	2,63	0,86	1,24	0,33	
U												0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	
Th			0,00	0,00		0,00					0,17	0,01	0,03	0,17	0,00				0,01	0,00	0,02	

### Annexe IV.3: Données individuelles des analyses effectuées au laser ICP-MS dans les carbonates de Bou Azzer en fonction des gisements étudiés

#### Annexe IV.3C : les veines - suite

Minéral Type de minéralisation	Calc4.2 Veines	Calc4.2 Veines	Calc4.2 Veines	Calc4.2 Veines	Calc4.2 Veines	Calc4.2 Veines	Calc4.2 Veines	Calc4.2 Veines	Calc4.2 Veines	Calc4.2 Veines	Calc4.2 Veines	Calc4.2 Veines	Calc4.2 Veines	Calc4.2 Veines	Calc4.2 Veines	Calc4.2 Veines	Calc4.2 Veines	Calc4.2 Veines	Calc4.2 Veines	Calc5 Veines	Calc5 Veines	Calc5 Veines
Ca (Std interne)	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767
Na		8						2		1	4						8		283	107	16	
Mg	219	214	219	219	222	222	225	224	214	212	222	222	214	210	207	208	202	213	662	11454	1133	
Al																			133	4801	29	
Si	909	1018	1025	969	915	876	853	953	950	958	990	820	898	935	869	878	981	842	1147	8939	1591	
K		2			1					1	2						2		26	394	17	
Mn	1475	1459	1450	1448	1453	1450	1451	1440	1413	1400	1408	1425	1471	1447	1411	1415	1400	1436	3502	4569	4533	
Fe	370	369	379	373	377	378	386	380	370	370	379	384	381	376	362	377	362	381	689	11318	928	
Li																			2	20	0	
B	0,16				0,17						0,32								0,49	1,35	0,45	
Co								0,10			0,10								0,07	2,75	0,05	
Ni																				6,53		
Cu			0,03							0,05	0,20									0,14	1,29	0,07
Zn		0,24		0,10	0,11				0,13	0,15	2,01	0,16					0,24			0,88	23,10	1,50
Ga		0,03									0,03						0,04			0,16	4,85	0,32
Ge	0,14	0,18	0,12	0,18	0,11	0,12	0,20	0,15	0,08	0,18	0,10	0,07	0,21	0,19	0,27	0,23	0,14	0,12	0,22	1,12	6,98	
Aq																						
As	0,67	1,57	0,49	0,51	0,53	0,66	0,53	5,99	0,52	0,99	3,98	1,06	0,50	0,52	0,49	0,45	0,53	0,67	2,35	4,61	3,69	
Sc	6,25	6,01	6,07	6,09	5,99	6,14	6,22	6,13	6,37	6,41	6,38	6,72	6,74	6,42	6,12	6,12	5,98	6,16	3,64	4,03	60,08	
Ti									0,26										0,20	29,82	0,28	
V																			1,32	21,46	1,05	
Cr	0,66			0,50						0,62	17,62				0,45		0,70			1,04	7,10	0,63
Rb	0,01	0,01			0,01	0,01		0,01		0,01	0,00				0,01	0,01	0,02		0,10	1,53	0,10	
Sr	126,57	130,55	129,53	130,20	130,39	129,88	130,10	131,29	130,28	131,33	129,61	129,92	134,93	133,74	131,90	131,80	134,88	132,05	150,01	519,53	265,32	
Y	55,64	54,44	53,89	53,64	53,73	53,62	53,74	53,45	53,84	53,63	51,83	53,30	55,49	52,93	53,07	50,78	51,07	49,58	16,62	11,29	184,74	
Zr							0,00													0,19	0,01	0,01
Nb					0,00															0,01	0,00	0,00
Cs		0,01						0,00	0,00								0,01			0,08	0,25	0,02
Ba	0,04	0,37	0,03	0,07	0,16	0,03		0,31	0,05	0,08	0,15	0,08	0,04	0,05	0,04	0,06	0,09	0,05	0,08	1,05	30,24	2,53
La	0,52	0,52	0,55	0,55	0,56	0,56	0,56	0,59	0,52	0,52	0,61	0,53	0,56	0,52	0,54	0,52	0,52	0,48	0,54	0,48	0,54	46,17
Ce	3,34	3,39	3,52	3,54	3,65	3,67	3,69	3,61	3,48	3,49	3,56	3,45	3,50	3,36	3,38	3,36	3,37	3,24	2,17	22,92	133,81	
Pr	0,76	0,78	0,78	0,81	0,82	0,82	0,85	0,83	0,78	0,79	0,80	0,81	0,80	0,79	0,78	0,76	0,77	0,76	0,46	3,71	23,61	
Nd	5,51	5,53	5,68	5,67	5,72	5,87	5,91	5,91	5,63	5,60	5,79	5,60	5,73	5,52	5,53	5,46	5,43	5,18	3,18	18,62	133,82	
Sm	2,69	2,70	2,62	2,61	2,75	2,65	2,70	2,79	2,61	2,67	2,57	2,67	2,69	2,71	2,58	2,46	2,49	2,47	1,46	5,51	40,74	
Eu	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,11	0,13	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,06	4,71	1,13	
Gd	5,36	5,19	5,20	5,28	5,26	5,26	5,33	5,38	5,24	5,23	5,00	5,24	5,45	5,13	5,30	4,88	5,11	4,91	2,31	4,96	46,91	
Tb	0,87	0,84	0,81	0,83	0,82	0,83	0,84	0,87	0,84	0,84	0,80	0,85	0,86	0,83	0,82	0,80	0,79	0,77	0,41	0,56	6,23	
Dy	5,82	5,51	5,46	5,40	5,40	5,44	5,43	5,66	5,49	5,48	5,41	5,44	5,69	5,50	5,47	5,19	5,29	5,05	2,47	2,46	33,71	
Ho	1,39	1,34	1,33	1,33	1,31	1,34	1,30	1,32	1,31	1,31	1,27	1,30	1,37	1,31	1,33	1,27	1,29	1,24	0,51	0,35	6,20	
Er	4,36	4,21	4,21	4,20	4,23	4,12	4,21	4,22	4,17	4,17	3,99	4,11	4,28	4,15	4,17	3,97	3,98	3,82	1,31	0,70	16,67	
Tm	0,64	0,65	0,62	0,63	0,64	0,62	0,62	0,63	0,63	0,63	0,60	0,63	0,67	0,63	0,63	0,59	0,60	0,58	0,20	0,07	2,33	
Yb	4,98	4,72	4,69	4,66	4,57	4,53	4,63	4,64	4,79	4,77	4,53	4,79	5,02	4,59	4,70	4,51	4,56	4,27	1,36	0,33	15,88	
Lu	0,89	0,88	0,86	0,89	0,87	0,85	0,83	0,83	0,87	0,88	0,84	0,86	0,91	0,89	0,87	0,85	0,83	0,82	0,21	0,03	2,39	
Hf										0,00						0,00				0,00	0,00	0,00
Ta					0,00										0,00	0,00				0,00	0,00	0,00
Bi																						
Pb	0,02	0,07	0,02	0,02	0,05	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,12	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,06	0,02	0,22	3,08	0,49	
U											0,00	0,00								0,01	0,00	
Th	0,00		0,00								0,00	0,00								0,02	2,38	0,03

### Annexe IV.3: Données individuelles des analyses effectuées au laser ICP-MS dans les carbonates de Bou Azzer en fonction des gisements étudiés

#### Annexe IV.3C : les veines - suite

Minéral	Calc5	Calc5	Calc5	Calc5	Calc5	Calc5	Calc5	Calc5	Calc5	Calc5	Calc5	Calc5	Calc5	Calc5	Calc5	Calc5	Calc5	Calc5	Calc5	Calc5	Calc5
Type de minéralisation	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines	Veines
Ca (Std interne)	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767	399767
Na	153	125	23	26	7	9	14	16	13	12	31	199	546	17	5	13	17	2	23	9	
Mg	461	469	431	3132	1179	1595	1658	2778	3964	1487	10414	75374	23543	8726	4042	4108	4163	3819	4304	4568	
Al	2	1	1	304	13	1	1	847	229	184	6247	54877	18375	35	76	2	237	72	224	170	
Si	1021	1078	1017	1750	870	1156	1624	2374	981	1698	9895	80635	28825	1014	821	1711	1461	1772	2176	2423	
K	11	11	8	19	7	1	42	110	7	51	1740	1347	1	2	1	4	1	5	6		
Mn	3639	3670	4042	2094	1909	1626	2841	2486	2378	2176	3227	5119	3029	2031	10058	2217	14287	11835	6712	12894	
Fe	533	539	549	2741	1452	1913	5111	2166	3160	1189	9409	82653	21100	3845	2180	2434	1798	1629	3672	2063	
Li	0,29	0,37	0,21	0,64		0,37	0,19	3,66	1,26	0,83	10,50	151,83	67,81	1,00	0,17	0,38	0,12		0,90		
B	0,26	0,31	0,19	0,32				0,57	0,22	0,38	0,97	11,36	10,64	0,29			0,25	0,18	0,31	0,26	
Co	0,04	0,04	0,03	0,09	0,01	0,21	260,07	0,30	0,05	0,07	6,76	28,55	6,87	0,03	8,51	0,12	0,57	0,06	0,16	1,75	
Ni				0,63		0,60	0,43	0,87			5,66	65,51	32,20				0,43		0,17	3,80	0,72
Cu	0,19	0,14	0,05	0,13	0,06	0,13	2,55	0,06	2,05	0,22	0,24	0,57	0,27	0,17	1,03	0,85	0,73	0,17	4,63	10,94	6,60
Zn	1,48	1,51	1,25	2,70	0,89	1,20	1,11	5,39	2,97	2,63	34,41	201,80	47,66	4,72	9,50	3,21	7,62	4,63	10,94	6,60	
Ga	0,24	2,51	0,30	1,53	0,40	1,11	0,83	1,38	1,80	0,81	3,89	26,68	9,81	2,25	1,20	1,60	1,09	0,47	2,52	0,70	
Ge	1,96	1,95	2,06					0,14			0,24	6,70	1,00				0,18	0,13	0,08		
Aq							0,99									0,07					0,02
As	2,55	2,47	2,16	1,67	1,51	6,86	6113,68		2,72	2,62	3,03	10,13	7,22	2,45	798,08	5,66	18,76	3,20	8,37	143,25	
Sc	8,39	8,57	8,14	0,13	0,05	0,04		0,73	0,22	0,18	1,57	53,62	8,21	0,05	0,15	0,11	0,08	0,16	0,06		
Ti	1,41	0,83	0,25	0,39	0,17			5,15	0,41	0,30	20,04	185,00	6252,30	0,16	0,46	0,24	0,23		0,25		
V	0,10	0,10	0,04	0,47	0,13	0,05		3,99	0,67	0,93	8,72	257,39	154,00						0,22		
Cr	0,53	0,50	0,45	0,47	0,72			1,83		1,03	5,63	114,60	68,14	0,37	0,69	0,50	0,82		0,62		
Rb	0,06	0,06	0,05	0,04	0,02	0,01	0,01	0,23	0,36	0,02	0,22	7,24	6,08		0,01		0,02	0,01	0,03	0,03	
Sr	163,47	165,77	167,29	608,46	606,05	694,63	545,95	721,63	618,45	599,98	562,49	721,97	563,15	721,82	377,68	743,44	314,58	272,26	527,66	235,33	
Y	39,46	40,61	35,57	0,09	0,01	0,01		0,59	0,08	0,14	0,19	22,23	5,25	0,09	2,66	0,23	4,71	4,06	1,70	4,60	
Zr				0,01		0,01		0,06		0,12	0,01	0,06	0,10	0,01	0,01	0,01	0,04	0,03	0,15	0,04	
Nb	0,00	0,00			0,00		0,00	0,01			0,01	0,07	3,91	0,00			0,00		0,00		
Cs	0,04	0,04	0,03	0,01	0,00			0,10	0,02	0,01	0,20	2,34	2,85		0,01		0,04	0,02	0,02	0,03	
Ba	2,30	24,37	2,91	12,70	3,53	9,39	6,51	8,75	15,31	6,31	14,58	47,70	28,14	18,94	9,67	14,02	9,33	4,34	21,59	5,89	
La	27,23	26,66	37,81	0,11	0,00	0,01	0,02	0,55	0,10	0,20	0,21	53,21	5,47	0,03	0,37	0,05	0,47	0,52	0,40	0,46	
Ce	54,17	54,00	71,54	0,16	0,01	0,01	0,02	0,99	0,19	0,32	0,45	114,50	10,60	0,05	0,41	0,07	0,76	1,01	0,67	0,74	
Pr	7,50	7,48	8,99	0,03	0,00	0,00	0,00	0,12	0,03	0,04	0,06	16,45	1,33	0,01	0,05	0,01	0,11	0,17	0,10	0,10	
Nd	35,87	35,85	38,76	0,10	0,01	0,01	0,02	0,43	0,12	0,15	0,24	77,19	5,37	0,02	0,24	0,06	0,57	0,94	0,49	0,53	
Sm	8,16	8,26	7,43	0,03	0,00			0,10	0,04	0,03	0,07	19,06	1,35	0,01	0,10	0,02	0,21	0,28	0,15	0,15	
Eu	0,23	0,24	0,15	1,22	0,20	0,14	0,50	1,51	1,39	1,04	2,42	1,86	2,44	0,12	2,76	0,14	2,54	2,63	3,04	3,06	
Gd	8,65	8,74	7,49	0,03			0,01	0,13	0,03	0,04	0,08	12,88	1,51	0,01	0,16	0,03	0,39	0,48	0,19	0,39	
Tb	1,21	1,23	1,04	0,00	0,00			0,02	0,00	0,00	0,01	1,17	0,23	0,00	0,03	0,00	0,05	0,06	0,02	0,05	
Dy	6,85	6,95	5,88	0,01			0,00	0,09	0,02	0,03	0,04	4,69	1,28	0,01	0,16	0,02	0,27	0,35	0,12	0,30	
Ho	1,27	1,32	1,13	0,00		0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,64	0,23	0,00	0,03	0,00	0,06	0,07	0,03	0,07	
Er	3,20	3,36	2,83	0,00	0,00			0,03	0,01	0,01	0,01	1,22	0,54	0,00	0,07	0,01	0,11	0,15	0,07	0,14	
Tm	0,42	0,43	0,35	0,00		0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,12	0,06	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,02	
Yb	2,71	2,74	2,12	0,00				0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,29	0,00	0,05	0,01	0,06	0,04	0,04	0,07	
Lu	0,38	0,38	0,28					0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,04	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	
Hf											0,00		0,01								0,00
Ta												0,01	0,30								
Bi				0,00		0,53	1,36								0,17		0,02		0,01	0,07	
Pb	0,65	0,63	0,29	1,07	0,65	0,68	7,03	0,63	1,11	0,53	0,97	4,59	2,12	1,44	2,82	1,31	3,64	1,16	2,87	2,04	
U	0,00	0,00	0,00					0,00		0,00	0,00	0,03	0,53				0,00				

**Annexe IV.4: Données individuelles des analyses effectuées au laser ICP-MS dans les spinelles de Bou Azzer en fonction des gisements étudiés (Fe : fer, Mg : magnésium, Al : aluminium, Cr : chrome, Mn : manganèse, Li : lithium, B : bore, Na : sodium, Si : silicium, P :phosphate, K : potassium, Ca : calcium, Sc : scandium, Ti : titane, V : vanadium, Co : cobalt, Ni : nickel, Cu: cuivre, Zn: zinc, Ag: argent, Ga: gallium, Ge: germanium, As: arsenic, Pb: plomb, Bi: bismuth).**

**Annexe IV.4A : Teneurs en ppm des spinelles dans la serpentinite**

Localisation	Lame	Fe (std interne)	Mg	Al	Cr	Mn	Li	B	Na	Si	P	K	Ca	Sc	Ti
Serpentinite	BAE46a	201910	5720 8	10195 4	36266 5	3197	3,3			3022				2,8	96
Serpentinite	BAE46a	201910	5819 5	10228 0	36344 5	3216	3,3			3356			118	2,7	97
Serpentinite	BAE46a	201910	5628 5	10335 9	37458 9	3358	2,5			3040				2,7	99
Serpentinite	BAE46a	201910	5846 7	10349 0	38111 5	3304	1,3			3111		3,2		4,0	97
Serpentinite	BAE46a	201910	5711 2	10405 0	36773 9	3260	3,1	1		2646				2,6	99
Serpentinite	BAE46a	201910	1880	1257	47167	3247	3,0	3	79	3970		43,2	3541	0,7	36
Serpentinite	BAE46a	201910	5081	3508	84113	3952	1,0	1	20	1114		6,3	1068	3,1	53
Serpentinite	BAE46a	201910	2870	2161	51343	2831	5,1	2	37	3435	2,1	9,4	8630	0,6	33
Serpentinite	BAE46a	201910	6451	4627	91752	4711	1,4	1	22	1152	1,5	4,8	904	6,6	54
Serpentinite	BAE46a	201910	3570	3918	79123	4459	1,8	1	27	1563	2,6	4,8	379	6,4	46
Serpentinite	BAE46a	201910	1329	2162	53894	3432	2,0	2	27	1631	1,5	8,0	1579	1,8	39
Serpentinite	BAE46a	201910	1053	1216	44534	3259	2,2	4	37	1739	1,7	12,0	3497	0,6	33
Serpentinite	BAE46a	201910	1679	1580	45551	2689	2,0	3	28	2711	2,7	8,2	10964	1,2	35
Serpentinite	BAE46a	201910	1132	1572	43770	2747	2,3	3	26	1799	2,1	7,8	8893	3,0	37



Serpentinite	BAE46a	201910	3425 5	36833	24090 4	2414			1	1421	9,2			5,4	16
Serpentinite	BAE46a	201910	2393 0	25043	15445 8	1890	0,3			832	4,4		36	7,9	25
Serpentinite	BAE46a	201910	2806 1	28610	18438 8	2254	1,3	1	5	1773	5,2	1,6	81	7,4	20
Serpentinite	BAE46a	201910	4500 9	56308	26467 7	2209	1,1	0	3	2357	6,8			3,7	18
Serpentinite	BAE46a	201910	4698 7	56031	29169 6	2346		0	2	1741	7,9		105	3,4	33
Serpentinite	BAE46a	201910	3849 8	45540	25306 9	2278			3	1393	5,9		1384	4,3	18

Suite :

Localisation	Lame	V	Co	Ni	Cu	Zn	Ag	Ga	Ge	As	Pb	Bi
Serpentinite	BAE46a	1847	741	225	22	3926		12	1	2		
Serpentinite	BAE46a	1882	721	238	19	3662		11	1	2		0,01
Serpentinite	BAE46a	1904	760	249	17	4430		11	1	2		
Serpentinite	BAE46a	1914	739	284	22	4112		17	1	2		0,01
Serpentinite	BAE46a	1898	711	274	16	3907		13	1	2		
Serpentinite	BAE46a	395	13	1862	1	1351	0,01	8	0	15	0,04	0,01
Serpentinite	BAE46a	445	76	1607	0	994		6	0	6	0,05	0,01
Serpentinite	BAE46a	426	17	2193	0	1136	0,01	8	0	16	0,05	0,03
Serpentinite	BAE46a	450	103	1552	0	1038		7	0	4	0,03	0,01
Serpentinite	BAE46a	434	57	1605	0	976		7	0	6	0,02	0,01

Serpentine	BAE46a	406	26	1744	0	1175	0,01	7	0	18	0,03	0,01
Serpentine	BAE46a	405	11	1725	0	1956	0,01	9	0	4	0,05	0,01
Serpentine	BAE46a	404	19	1937	3	1489	0,01	8	1	102	0,11	0,16
Serpentine	BAE46a	447	18	1974	0	937		9	1	19	0,04	0,01
Serpentine	BAE46a	412	517	531	0	2730		3	0	1	0,00	0,00
Serpentine	BAE46a	308	378	1137	0	1596		4	0	2	0,01	0,00
Serpentine	BAE46a	314	430	830	0	2015		5	0	4	0,04	0,01
Serpentine	BAE46a	983	554	647	1	3274		3	1	4	0,02	
Serpentine	BAE46a	998	580	549	1	3306	0,02	2	1	1	0,01	
Serpentine	BAE46a	802	563	539	0	2329		3	0	5	0,03	0,00

## Annexe IV.4B : Teneurs en ppm des spinelles dans les minéralisations massives

Localisation	Lame	Fe (std interne)	Mg	Al	Cr	Mn	Li	B	Na	Si	P	K	Ca	Sc	Ti
Min. massives	BAE71c3	201910	19748	5824	161793	9366	9,1	23	107	5690	6,3	31,0	1270	13,1	122
Min. massives	BAE71c3	201910	19632	15722	141506	3094	0,8	1	12	1446		3,5	105	8,5	52
Min. massives	BAE71c3	201910	1476	23401	234822	36183	2,4	239	232	63981	13,0	91,8	76069	420,0	3122
Min. massives	BAE71c3	201910	10812	8135	114019	3446	1,2	1	18	1376		3,7	1525	10,0	48
Min. massives	BAE71c3	201910	11141	7932	112451	3474	1,1	1	19	1357		4,0	1414	9,8	48
Min. massives	BAE71c3	201910	1932	1843	38919	2477	3,9	3	20	2640	2,9	8,5	20462	5,5	35
Min. massives	BAE71c3	201910	1419	1416	34185	2122	3,6	3	27	2316	2,2	11,1	5089	2,0	26
Min. massives	BAE71c3	201910	2200	1526	32324	1381	0,5	1	9	687	2,3	1,9	3352	5,4	26
Min. massives	BAE71c3	201910	2054	3402	55116	2768	1,6	2	25	1423	2,6	5,4	3401	7,5	41
Min. massives	BAE71c3	201910	58895	64837	284663	2393	1,1	5	62	17528	9,0	21,4	120	4,2	33
Min. massives	BAE71c3	201910	1302	21781	229292	36036	1,9	243	177	58978	10,4	68,6	69249	734,5	3364
Min. massives	BAE71c3	201910	1667	2409	38487	2568	3,2	2	34	2381	1,7	10,9	3949	4,1	34
Min. massives	BAE71c3	201910	1587	2271	39900	2570	2,8	2	29	2415	1,8	8,8	2658	3,8	30
Min. massives	BAE71c3	201910	26810	40523	199415	23889	24,7	185	67	97109		31,6	126917	10,6	246
Min. massives	BAE71c3	201910	9070	36502	196370	20167	10,0	141	75	76542		20,4	102079	13,5	259
Min. massives	BAE71c3	201910	5304	44742	200459	24417	6,2	185	88	102333	7,0	53,1	147694	14,3	412
Min. massives	BAE71c3	201910	1305	1474	31944	1602	0,5	1	6	520	2,4	1,6	7639	4,6	26
Min. massives	BAE71c3	201910	34261	39604	208500	2073		0	17	3520	3,6	2,7		5,3	15
Min. massives	BAE71c3	201910	36072	40369	243330	2608			1	1830	6,5		61	6,8	12

Min. massives	BAE71c3	201910	631	2107	36858	2319	2,7	3	41	1011	3,1	10,4	12402	1,0	26
Min. massives	BAE71c3	201910	917	3137	50326	4123	5,0	7	115	1460	2,9	31,9	7235	1,1	49
Min. massives	BAE71c3	201910	1392	4625	56326	3998	4,8	5	62	1433	3,3	13,8	10725	1,1	47
Min. massives	BAE71c3	201910	1187	4517	58230	3757	4,4	5	60	1186	2,8	13,6	9715	1,0	43
Min. massives	BAE71c3	201910	904	2280	37379	2478	3,8	3	46	1357	2,3	14,5	5627	0,5	27
Min. massives	BAE71c3	201910	1321	1554	26724	1629	2,7	2	25	993	2,2	5,2	1978	0,4	20
Min. massives	BAE71c3	201910	5774	7356	87433	4178	1,1	1	22	827	3,3	4,3	198	1,5	67

Suite :

Localisation	Lame	V	Co	Ni	Cu	Zn	Ag	Ga	Ge	As	Pb	Bi
Min. massives	BAE71c3	280	509	1413	1	3219	0,01	36	1	594	0,26	0,24
Min. massives	BAE71c3	190	393	1280	0	1984		4	0	14	0,03	0,01
Min. massives	BAE71c3	2186	130	744	2	17516	0,10	107	15	731	1,55	3,53
Min. massives	BAE71c3	478	203	1664	0	1226		8	0	195	0,32	0,06
Min. massives	BAE71c3	474	204	1622	6	1220	0,01	8	0	192	0,31	0,06
Min. massives	BAE71c3	519	28	2857	6	730	0,01	9	1	59	0,24	0,10
Min. massives	BAE71c3	394	13	1826	3	741		8	1	19	0,04	0,05
Min. massives	BAE71c3	382	32	2250	0	338		6	0	13	0,04	0,03
Min. massives	BAE71c3	465	50	2097	1	774		8	0	19	0,05	0,02
Min. massives	BAE71c3	1064	630	624	2	3976		3	1	1	0,02	0,01

Min. massives	BAE71c3	2242	127	790	1	17333	0,11	104	18	766	1,63	6,08
Min. massives	BAE71c3	454	20	1983	0	823		9	0	32	0,02	0,01
Min. massives	BAE71c3	408	19	2105	2	771		8	0	54	0,04	0,12
Min. massives	BAE71c3	861	281	1826	2	3976	0,13	60	11	1561	2,98	9,27
Min. massives	BAE71c3	796	286	1860	2	3923	0,11	52	7	1627	2,12	14,22
Min. massives	BAE71c3	1006	176	2915	1	4884	0,19	71	12	2839	3,00	22,09
Min. massives	BAE71c3	393	33	2195	21	336	0,02	5	0	131	0,21	0,38
Min. massives	BAE71c3	519	464	878	0	2590	0,02	4	0	1	0,02	0,01
Min. massives	BAE71c3	501	561	537	0	2892		4	0	1		
Min. massives	BAE71c3	254	17	2855	5	1386	0,01	8	1	46	0,07	0,02
Min. massives	BAE71c3	345	35	2129	0	2965	0,02	11	1	108	0,09	0,02
Min. massives	BAE71c3	331	53	2310	1	1887	0,01	10	1	72	0,10	0,02
Min. massives	BAE71c3	316	55	2253	11	1841	0,05	9	0	70	0,38	0,03
Min. massives	BAE71c3	273	14	2627	0	1371	0,01	8	0	106	0,04	0,02
Min. massives	BAE71c3	218	18	2563	0	797	0,01	5	0	21	0,02	0,01
Min. massives	BAE71c3	414	159	2106	0	1099	0,01	7	0	4	0,04	0,01

#### Annexe IV.4C : Teneurs en ppm des éléments des spinelles dans les poches

Localisation	Lame	Fe (std interne)	Mg	Al	Cr	Mn	Li	B	Na	Si	P	K	Ca	Sc	Ti
Poches	BAE68f2	201910	58833	108655	349300	2959				3434			112	3,3	47

Poches	BAE68f2	201910	55103	110836	341321	2994	2,8			2972			137	1,5	51
Poches	BAE68f2	201933	42232	66182	370209	6871	5,6	3	5	5206		3,4		0,8	187
Poches	BAE68f2	201933	38635	62923	376868	7030	4,4	1	13	2825					188
Poches	BAE68f2	201933	36766	59354	349932	6946	4,6		2	2420	9,2	3,1	104	0,4	171
Poches	BAE68f2	201933	56045	115787	344460	3017	2,2	1		2608	14,5		186	2,5	115
Poches	BAE68f2	201933	68722	126714	357204	2536	1,4			3180	15,2			6,7	137
Poches	BAE68f2	201933	48221	69754	379066	3269				2404			150	6,0	139
Poches	BAE68f2	201933	56879	103923	373424	3344	4,0			2124			125	2,3	95
Poches	BAE68f2	201910	56856	101911	368395	3338	3,8		2	2555	18,4			1,9	104

Suite :

Localisation	Lame	V	Co	Ni	Cu	Zn	Ag	Ga	Ge	As	Pb	Bi
Poches	BAE68f2	1865	636	340	22	3581		19	1			
Poches	BAE68f2	1851	746	232	10	4791		11	1	1	0,01	
Poches	BAE68f2	1349	801	90	2	3173		5	1	12	0,16	
Poches	BAE68f2	1340	822	49	1	3874		1	1	3	0,02	
Poches	BAE68f2	1239	818	51	1	4672		2	1	2	0,13	
Poches	BAE68f2	1757	768	319	14	5735		15	1	1		
Poches	BAE68f2	2158	656	434	9	3810		23	1	2		
Poches	BAE68f2	1796	613	254	15	2848		16	1	2		

---

Poches	BAE68f2	1865	806	209	17	4937		10	1	2		
Poches	BAE68f2	1897	789	201	16	4431		7	1	2		

---

## Abstract

The Co-Ni district of Bou Azzer (Anti-Atlas, Morocco) is a unique and particular type of deposit because formed in a context of a carbonated serpentinite. Two types of mineralisation are exploited: massive orebodies and a system of veins.

The massive mineralisation consists of lenticular metallic bodies, oriented N120°E and essentially enriched in Ni- and Co-arsenides. They are located at the contact between serpentinite, quartz diorite and Precambrian volcanic rocks. They were formed of moderate temperatures (*ca.* 220°C), high salinity (38% wt NaCl eq.) of the fluids and pressures between 67 and 2883 bars.

The vein system is controlled by faults that are systematically mineralised in Co- and Fe-arsenides when they intersect the massive mineralisation. These veins intersect all lithologic units of the Bou Azzer inlier, except for the Cambrian sedimentary formation. They are trending between NS to N070°E and are systematically associated with normal movements in vertical planes. In the horizontal plane, the mineralised faults present sinistral or dextral motions coherent with a transtensive context controlled by a N030°E shortening direction. Associated fluid yields minimum temperatures of emplacement of 170°C in average, salinity between 32 and 41% wt NaCl eq. and pressures ranging from 24 to 1800 bars.

All structures describe the same mineral paragenesis, similar textures and are associated with similar gangues (quartz and carbonates). Fluids evolve from Ni-(Co-Fe) rich end-member to Co-(Ni-Fe) rich one, from massive mineralisation to vein formation indicating a continuum in the formation of both mineralisation types.

Two types of textures are observed in massive mineralisation: a Brecciated Massive Mineralisation (BMM) texture and a Laminated Massive Mineralisation (LMM) one. BMM is characterised by: i) Ni-/Co-arsenides fractured by serpentine; ii) residual fragments of serpentinite, iii) relictic spinel and iv) fragments of Ni-arsenides isolated within the carbonated gangue. The texture of the gangue reflects the fact that these mineralised lenses are certainly previously formed brecciated bodies of an early gangue of serpentinite and spinel relicts. The LMM is described as alternating Ni-arsenides and carbonated gangue layers. The combination of these two textures reflects the early architecture of the faulted contact, i.e. the BMM are ancient brecciated bodies whereas the LMM are witness of ancient mylonitic levels.

Geochemical analyses carried out on arsenides, carbonates, spinels and fluid inclusions show a common enrichment in Co, Ni, As, Zn, Bi, Cu, Ag and Au and the same signatures of Na versus K, Li versus B, V versus Cr, As versus V, Zn versus V, Co versus Cr. The close relationship between these mineralisations and their host-rocks indicates that the leaching of pre-existing ultramafic fragments (spinel and Ni-arsenides) by a mineralising fluid and the in-situ metal precipitation are the processes at the origin of the Co-Ni ore at Bou Azzer.

The early formation of the brecciated serpentinite host rock is interpreted as a result of crustal thinning in a hyper-extensional context that occurred around 540-560 Ma and accompanied by an initiation of oceanic crust formation. The circulation of seawater in the mantle would be the main agent of its serpentinisation. The exhumation would be the vector of the rise and the brecciation of the serpentinite put in contact with a quartz diorite. Consequently, the formation of the Bou Azzer mineralisation would begin with the serpentinisation process, described during the early stages of the mineralisation process and ended by tectonically controlled vein formation.

Keywords: Hydrothermalism, Paleofluids, Bou Azzer district, Cobalt, Serpentinite, Exhumation



---

## Résumé

Le district de cobalt-nickel de Bou Azzer, localisé au Maroc, est un gisement unique au monde mis en place dans un environnement de serpentinite carbonatée. Deux types de minéralisations sont exploités : des minéralisations massives et un système de veines.

Les minéralisations massives sont des corps métalliques, sous forme de lentilles, orientées N120°E et essentiellement enrichies en arséniures de nickel et de cobalt. Elles sont localisées au contact entre une serpentinite, une diorite quartzique ou des roches volcaniques précambriennes. Leur mise en place se fait dans des conditions de moyennes températures (à 220°C en moyenne), de fortes salinités à 38%pds eq. NaCl et de pressions variables entre 67-2883 bars.

Le système de veines est contrôlé par des failles systématiquement minéralisées en arséniures de cobalt et de fer lorsqu'elles recoupent les minéralisations massives. Ces failles recoupent toutes les unités lithologiques de la boutonnière de Bou Azzer, sauf la formation sédimentaire cambrienne. Elles ont des orientations oscillants entre N/S à N 070°E et sont systématiquement associées à un mouvement normal observé dans le plan vertical. Dans le plan horizontal, les failles minéralisées présentent des jeux sénestres ou dextres cohérents avec un contrôle transtensif selon une direction de raccourcissement orientée N030°E. Le fluide du système de veines décrit des températures à 170°C en moyenne des salinités entre 32 et 41 %pds eq. NaCl et des pressions variant de 24 et 1800 bars. Les trois types de structures décrivent la même paragenèse minérale, les mêmes textures et les mêmes types de gangues encaissant les minéralisations (quartz et carbonates). Le système évolue de fluides riches en Ni-(Co-Fe) à des fluides riches en Co-(Ni-Fe) depuis les minéralisations massives jusqu'aux systèmes des veines induisant un continuum dans la formation de ces deux types de minéralisations.

Deux types de textures sont également observés au sein des minéralisations massives : i) une texture Bréchifiée des Minéralisations Massives (BMM) et une texture Laminée des Minéralisations Massives (LMM). La BMM est illustrée par des arséniures de nickel et de cobalt fracturés par de la serpentine, par des fragments résiduels de serpentinite, des reliques de spinelles et des fragments d'arséniures de nickel isolés au sein de la gangue carbonatée. La texture de la gangue traduit le fait que ces lentilles minéralisées sont certainement d'anciens corps bréchifiés d'une gangue précoce de serpentinite et des reliques de spinelles. La LMM est décrite par des niveaux alternant entre des arséniures de nickel et de la gangue carbonatée. Cette texture traduit l'architecture précoce du contact faillé sous forme d'anciens lits de spinelles remobilisés par le fluide minéralisateur.

Les analyses géochimiques menées sur les arséniures, les gangues carbonatées, les spinelles et le fluide montrent un enrichissement commun en Co, Ni, As, Zn, Bi, Cu, Ag et Au et la même signature en Na/K, Li/B, V/Cr, As/V, Zn/V, Co/Cr. La relation étroite entre ces minéralisations et leurs encaissants indique que le lessivage des fragments de serpentinite pré-existants (spinelles et arséniures de nickel) par un fluide minéralisateur et la précipitation in-situ des métaux sont les processus à l'origine des gisements de cobalt-nickel de Bou Azzer.

La formation précoce de la gangue de serpentinites résulterait d'un amincissement crustal en contexte hyper-extensif en transtension décrit il y a 540-560 Ma et accompagné d'un début d'océanisation lors de la formation du complexe supérieur. La circulation d'eau de mer dans le manteau serait l'agent principal de sa serpentinitisation. L'exhumation serait le vecteur de la remontée et de la bréchification de la serpentinite mise en contact avec une diorite quartzique. Le timing de formation des minéralisations de Bou Azzer débiterait avec le processus de serpentinitisation, décrit pendant les premiers stades de la formation des minéralisations.

Mots-clés : Hydrothermalisme, Paléofluides, District de Bou Azzer, Cobalt, Serpentinite, Exhumation