

L'impact de la Serpentinisation sur les Gisements de Nickel, de Chromite et de Cobalt du district Minier De Bou Azzer, (Anti-Atlas Central)

[Impact of Serpentinization on Deposits of Nickel, Chromite and Cobalt, Mining District of Bou Azzer, (Central Anti-Atlas)]

Mohamed BHILISSE¹, Amina WAFIK¹, Hassan ADMOU¹, Lhou MAACHA², and Marc CONSTANTIN³

¹Département de Géologie,
Université Cadi Ayyad, Faculté des sciences semlalia, laboratoire dynamique de la lithosphère et genèse des ressources minérales et Énergétiques,
Marrakech, Morocco

²Directeur générale exploration et développement à Managem, Twin center, tour A BP5199,
Casablanca, Morocco

³Département de géologie et de génie géologique,
Faculté des sciences et de genie,
Québec, Canada

Copyright © 2014 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the ***Creative Commons Attribution License***, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Several mineralizations types are associated with ophiolite of Bou Azzer (i) in transition area the nickel mineralization are scattered (ii) podiform chromite deposits and associated PGE (iii) gold and palladium mineralization of Bleida Far West cashed by basic rocks of cumulates (vi) hydrothermal stockworks mineralizations of cobalt, nickel, arsenic and gold of Bou Azzer. The genesis of those mineralizations is result of both hydrothermal and tectono-magmatic processes. The results show that a primary paragenesis of magmatic origin with pentlandite, chromospinel, and cobaltiferous and nickeliferous magnetite has been highlighted in Ambed massive where the serpentinization of ultramafic rocks is partial, and it is probably associated with Fe sulphides. However, the mineralogical assemblages identified in Aghbar and Bou Azzer East massive where serpentinization is total are composed on secondary minerals of polydymite cobaltiferous, millerite cobaltiferous, orcelite and magnetite cobalti-nickeleferous. These mineralizations could come during serpentinization from mutation of a primary mineral paragenesis formed on olivine and pentlandite+pyrrhotite aggregates. For chromite mineralization, the Scanning Electron Microscope observations show a textural relationship between serpentine minerals and chromite crystals which reflect a precocious serpentinization setting on same time of chromite pods. The genesis of cobaltiferous hydrothermal mineralizations is basically related to the serpentinization process. In tectonical term, serpentinization modify serpentine plasticity and provide doming phenomenon and has important contribution on genesis and structural context of Bou Azzer mineralized corps. In chemical level, serpentinization control the mobility of nickel and cobalt exist in primary ultramafic minerals which marked in arsenides, sulfides and iron oxides.

KEYWORDS: mineralizations, hydrothermal, basic rocks, pentlandite, polydymite cobaltiferous, millerite cobaltiferous.

RESUME: Plusieurs types de minéralisations sont associés à l' ophiolite de Bou Azzer et correspondent essentiellement à (i) des minéralisations disséminées de nickel dans les termes de la zone de transition de la série ophiolitique (ii) des gisements de chromite podiformes et les PGE associés (iii) des minéralisations à or et palladium de Bleida Far-West encaissées par des

roches basiques des cumulats (vi) les minéralisations filoniennes hydrothermales de cobalt, nickel, arsenic et or de Bou Azer. La genèse de ces minéralisations est le résultat de plusieurs processus hydrothermaux et tectono-magmatiques superposés. Dans le massif d'Ambed où la serpentinisation des roches ultrabasiques n'est que partielle, une paragenèse primaire d'origine magmatique à pentlandite, chromospinel et magnétite cobaltifère et nickélifère a été mise en évidence et serait probablement associée aux sulfures de Fe. En revanche, dans les massifs d'Aghbar et de Bou Azer Est où la serpentinisation est totale, l'assemblage minéralogique identifié est composé essentiellement de minéraux secondaires de polydymite cobaltifère, millerite cobaltifère, orcelite et magnétite cobaltifère et nickélifère. Ces phases pourraient provenir du remplacement, lors de la serpentinisation, d'une paragenèse minérale primaire formée, en plus de l'olivine, d'agrégats de pentlandite+pyrrhotite. Pour ce qui est de la chromite, les relations texturales relevées au microscope électronique à balayage entre les minéraux serpentiniteux et les cristaux de chromites stipulent une serpentinisation précoce synchrone de la mise en place des pods de chromite. En ce qui concerne les minéralisations filoniennes hydrothermales de cobalt, la serpentinisation a joué un rôle primordial pour leur genèse. La serpentinisation a modifié les propriétés de plasticité des serpentines et a favorisé le phénomène de doming, panafricains et tardipanafricains, et dont le rôle est majeur dans la genèse et la structuration des corps minéralisés de Bou Azer. Sur un plan chimique, la serpentinisation a conditionné la mobilité et le lessivage du nickel et du cobalt contenus dans les minéraux ultramafiques primaires en les reconcentrant dans les arséniures, sulfures et oxydes de fer.

MOTS-CLEFS: Minéralisation, Roches basiques, Hydrothermal, Pentlandite, Polydymite cobaltifère, Millerite cobaltifère.

1 INTRODUCTION

La boutonnière de Bou Azer–El Graara est située dans l'Anti-Atlas central à 45 km à vol d'oiseau au SW de Ouarzazate (GPS : N30°31'16.17", W 6°54'37.15", alt. 1350m). Cette boutonnière jalonne l'accident majeur de l'Anti Atlas «l'AMAA» et correspond à l'érosion d'un pli hercynien, ayant affecté la couverture cambrienne et laissant apparaître les dépôts protérozoïque [1]. Elle est orientée WNW-ESE, selon une longueur de 60 Km et une largeur variable entre 5 et 20 km, comprend deux districts miniers : (i) le district à Cobalt, Nickel, Arsenic, Argent, et Or de Bou Azer à l'ouest ; (ii) le district à Cu et Or de Bleïda à l'est.

Cette boutonnière est compte plus de 100 corps minéralisés en arséniures de cobalt. Des travaux d'exploration récents menés ont permis de mettre en évidence un autre type de minéralisation à nickel et chrome encaissée par les roches ultrabasiques. Ces gisements sont à priori de grandes tailles mais à teneur modérée sans PGE confirmés jusqu'à maintenant. Toutefois, les modèles génétiques de sa mise en place restent très controversés, autant que le modèle métallogénique et l'âge de la minéralisation en Co, Ni, Au, Ag restent sujets à débat entre les différents auteurs ayant travaillé sur le secteur.

La distribution de la minéralisation Co-Ni-As de Bou Azer le long des contacts serpentinites et diorites quartziques orogéniques ou au sein des serpentinites et les hypothèses proposées pour ces minéralisations placent le phénomène de serpentinisation au cœur des processus de genèse. Cette dernière qui fait l'objet du présent travail, comme un phénomène clé dans le transfert de la matière.

Cette publication a pour but de présenter, le rôle de la serpentinisation sur la propriété des serpentines et sur la mobilité et le leaching du nickel et du cobalt contenus dans les minéraux ultramafiques primaires et aussi l'impact de cette serpentinisation sur les principaux gisements minéralisés de cobalt, chromite et Nickel de Bou azer, suivant un étude basé sur la caractérisation minéralogique et métallographique , au microscope électronique à balayage et à la diffraction aux rayons X (Laboratoire d'analyse, Réminex Managem) et des analyses géochimiques effectuées de l'ICP au laboratoire de "Stewart Geochemical and Essay" en Russie.

2 CONTEXTE GEOLOGIQUE DE LA BOUTONNIERE DE BOU AZZER

La boutonnière de Bou Azer-El Grâara correspond à une structure antiforme varisque qui s'est superposée à une zone de suture panafricaine matérialisée par l'accident majeur de l'Anti-Atlas [2]. Cette suture est soulignée par la présence d'une ophiolite complète considérée parmi les plus anciennes du monde Qui .affleure; en plus de Bou Azer, dans fenetre de Khzama au massif de Siroua (Fig.1)

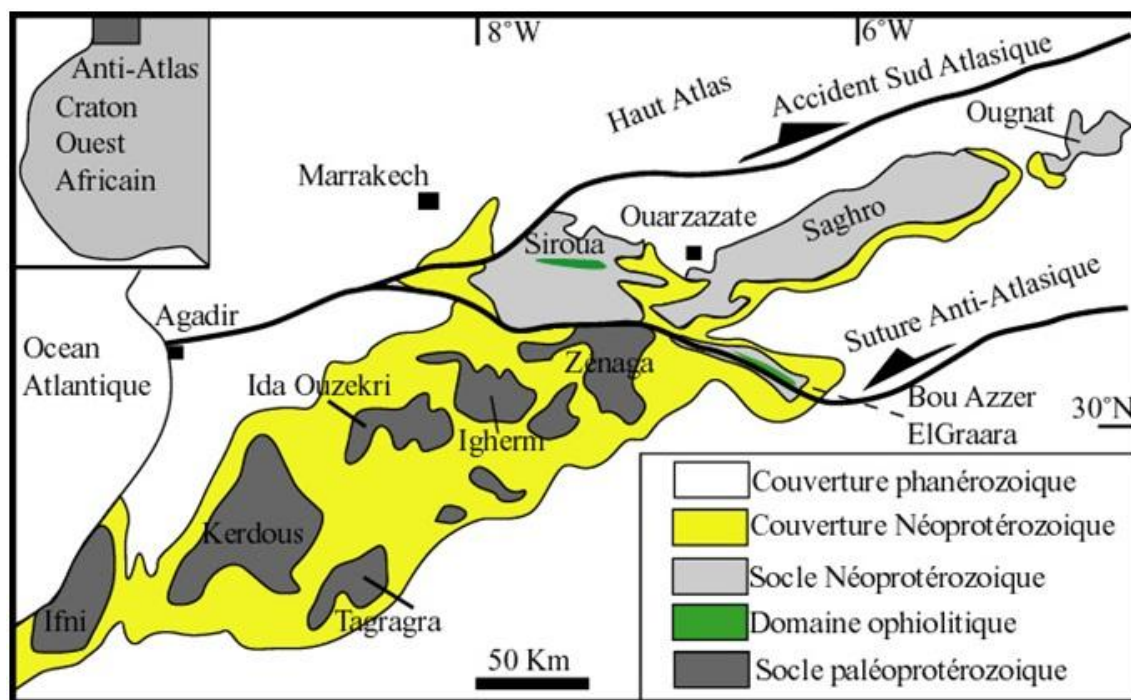


Fig. 1. Suture panafricaine de Bou Azzer- Siroua dans l'Anti Atlas.

D'après les dernières subdivisions stratigraphiques adoptées pour les terrains de la boutonnière de Bou Azzer El Graara central ([3], [4], [5]), (**Tableau.1**), Les terrains précambriens affleurant dans cette boutonnière sont subdivisés en deux grands ensembles lithologiques et structuraux:

Un ensemble magmato-métamorphique, plus ancien, d'âge néoproterozoïque inférieur et moyen (tonien et cryogénien).

Un ensemble postérieur non-métamorphique d'âge néoproterozoïque supérieur et terminal (cryogénien supérieur et Ediacarien).

L'ensemble métamorphique est formé d'empilements complexes d'écaillés tectoniques résultant de la collision panafricaine, et qui comportent, i) des orthogneiss et des métagabbros au sud (Igrane, Tazigzaout, Oumlil et Bou Azzer), autrefois décrits comme des terrains paléoproterozoïques (PI) ([6],[1]) et dont le protolite a été ultérieurement daté aux alentours de 750 Ma ([7],[8]) ; ii) des dépôts de la plateforme néoproterozoïque établie sur la marge nord du craton ouest-africain (Groupe de Taghdoute-Lkest), auxquels est associée la minéralisation cuprifère de Bleïda; iii) des séries volcano-sédimentaires de Tichibanine-Ben Lgrad au nord dont l'affinité d'arc est bien établie ([9],[10]) ; et enfin, iv) le Complexe ophiolitique de Bou Azzer qui, bien qu'incomplet et fortement démembré, présente toutes les unités typique d'une suite ophiolitique ([1],[11]). L'ensemble de ces unités métamorphiques est recoupé par des diorites syntectoniques datées aux alentours de 650 Ma ([12]).

L'ensemble non-métamorphique repose en discordance majeure sur le substratum panafricain et comporte : i) à la base, les séries clastiques du Groupe de Tidilline, redressées et plissées dans des couloirs faillés lors des derniers stades de la tectonique panafricaine, et ii) les coulées pyroclastiques et dépôts volcano-détritiques du Groupe d'Ouarzazate qui repose en discordance angulaire sur celui de Tidilline. Les couches sédimentaires du Cambrien font suite sans hiatus important à ces dépôts fini-précambrien (Ediacarien).

Table 1. Nomenclature des dernières subdivisions lithostratigraphiques adoptés pour la boutonnière de Bou Azzer-El Graara.

Age		Complexe /Groupe/formation
Néoprotérozoïque supérieur à Cambrien Inférieur	Ediacarien supérieur et Cambrien	Groupe de Tata Formation d'Adoudou
Néoprotérozoïque supérieur et terminal (<i>Ensemble non métamorphique</i>)	Ediacarien supérieur (NP3)	- Groupe de Ouarzazate (580-534 Ma) - Groupe de Tidilline (625-600 Ma)
Néoprotérozoïque moyen (<i>Ensemble métamorphique</i>)	Cryogénien supérieur (NP2s)	Groupe de Bou Azzer - El Graara : - Complexe ophiolitique de Bou Azzer El Graara - Suite volcano-sédimentaire de Skouraz (environ 660-640Ma)
	Cryogénien inférieur (NP2i)	Complexe plutono-métamorphique d'Assif n'Bougmmmane – Takroumt (750-700Ma) Groupe Tichibanine - Ben Lgrad (760 Ma)
	Tonien à Cryogénien (NP1-2)	Groupe Tachdamt – Bleïda (environ 800Ma)

La carte structurale de la boutonnière présentée ci-dessous (Fig.2) prend en considération la nouvelle répartition stratigraphique basée sur les données géochronologiques récentes découvertes dans la boutonnière.

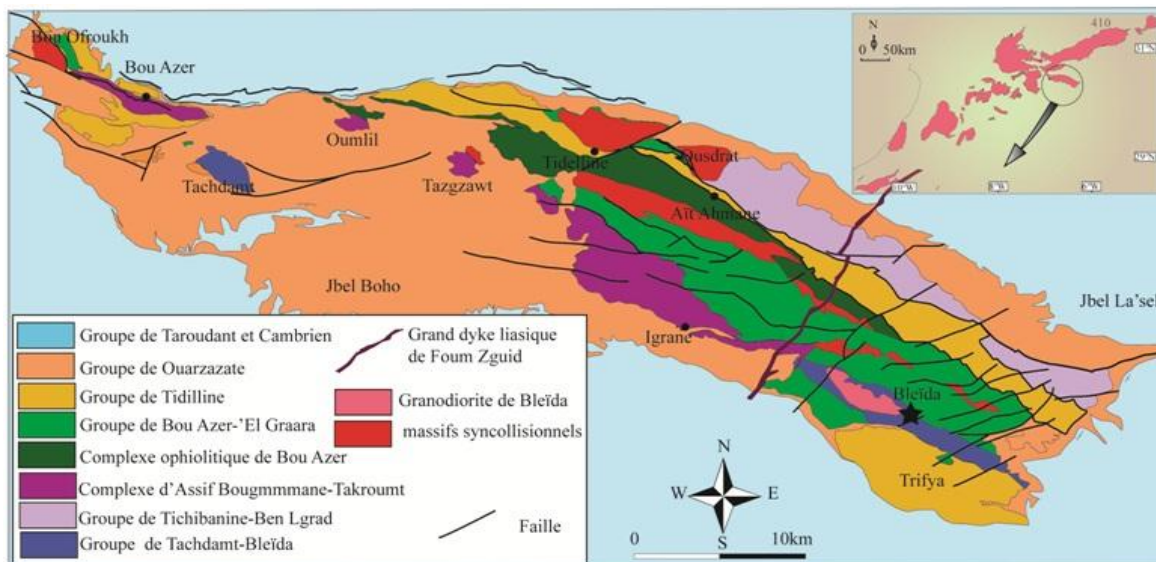


Fig. 2. Schéma structural de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara

La distribution de la minéralisation Co-Ni-As de Bou Azzer le long des contacts serpentinites ophiolitiques/diorites quartziques orogéniques ou au sein des serpentinites, impose la serpentinitisation qui fait l'objet du présent travail, comme le phénomène clé dans le transfert de matière. Nous nous sommes basés sur la caractérisation minéralogique au microscope en lumière transmise et réfléchie, au microscope électronique à balayage et à la diffraction aux rayons X (Laboratoire d'analyse, Réminex Managem) et des analyses effectuées par ICP au laboratoire de "Stewart Geochemical and Essay" en Russie.

3 MATÉRIEL ET MÉTHODES

L'approche adoptée pour répondre aux objectifs cités a débuté par une cartographie fine des secteurs serpentinisés, afin d'identifier les lithologies présentes dans ces zones ainsi que leurs relations structurales.

L'observation des échantillons au microscope optique a ensuite été nécessaire pour documenter la nature des minéraux, les textures et les structures minéralogiques, ainsi que pour caractériser les différentes phases de serpentinisation et les paragenèses.

Cette publication a pour but de présenter, le rôle de la serpentinisation sur la propriété des serpentines et sur la mobilité et le leaching du nickel et du cobalt contenus dans les minéraux ultramafiques primaires et aussi l'impact de cette serpentinisation sur les principaux gisements minéralisés de cobalt, chromite et Nickel de Bou azzer, suivant un étude basé sur la caractérisation minéralogique et métallographique, au microscope électronique à balayage et à la diffraction aux rayons X (Laboratoire d'analyse, Réminex Managem) et des analyses géochimiques effectuées de l'ICP au laboratoire de "Stewart Geochemical and Essay" en Russie.

4 ETUDE PETROGRAPHIQUE ET MINERALOGIE DES SERPENTINITES

Aussi bien à l'échelle de l'affleurement qu'à l'échelle de la lame, les roches mantelliques de Bou Azzer, montrent des cisaillements et des fracturations intenses dans lesquels se font des cristallisations du chrysotile et de la lizardite en différents épisodes. Selon les endroits la serpentinite peut être calcifiée ou carbonatée ([1], [13], [14]). Un autre type d'altération hydrothermale a été répertorié, il s'agit de la liswénitisation ([15]).

La serpentinisation à Bou Azzer, s'est effectuée en deux phases : une serpentinisation pseudomorphique matérialisée par de la serpophite isotrope préservant la forme primaire des cristaux d'olivine, avec souvent des aiguilles d'antigorite fibro-radiée. La brucite est assez fréquente dans les serpentinites de Bou Azzer, elle se présente sous forme d'inclusions au sein des serpentines ([13]). Ces structures sont traversées d'un réseau de veinules, en remplissage de fractures ouvertes, où se disposent par ordre chronologique : l'antigorite, la lizardite et le chrysotile. Ces veines sont également soulignées par de la magnétite secondaire et des sulfures (chalcopyrite et pyrite essentiellement). Ces paragenèses opaques sont liées à la serpentinisation. En effet les serpentinites de Bou Azzer, sont dominées par l'antigorite, les espaces interstitiels et les plans de schistosité sont soulignés par des lamines épaisses de magnétite visibles macroscopiquement et microscopiquement. Cet auteur avance que la serpentinite a constitué un stock initial pour la minéralisation de Ni-Co de Bou Azzer, reconcentrée tardivement par les événements tectono-magmatiques ayant eu lieu tardivement.

4.1 DONNEES DE TERRAIN

A Bou Azzer, la serpentinisation a affecté la quasi totalité des roches ultrabasiqes. Dans le cadre de notre travail nous avons procédé à une cartographie fine des massifs serpentineux, afin de déterminer les éventuels variations de faciès zonalité et gradients. Nous nous sommes focalisés sur les massifs d'ouest en Est : Mechoui, Ambed, Ait Ahmane et Ait Abdallah.

L'étude de terrain a mis en évidence un gradient tant à l'horizontale qu'à la verticale. En effet, les roches ultrabasiqes de la partie ouest de la boutonnière notamment au niveau du secteur de Bou Offroh sont totalement serpentinisées tandis que le processus de serpentinisation est partiel à Ambed et presque absent plus à l'Est dans certaines zones au niveau d'Ait Ahmane et Ait Abdallah. A une échelle verticale et au niveau de toute la boutonnière, nous avons répertorié des plots (butes témoins) de roches ultrabasiqes et partiellement serpentinisées. Ces observations nous amènent à supposer que la serpentinisation des formations ultrabasiqes des ophiolites de Bou Azzer a affecté d'une manière homogène l'ensemble de la série et que les gradients actuels sont conséqents des niveaux d'érosion qui s'approfondissent de l'est vers l'ouest.

4.2 LA MINERALOGIE DES SERPENTINITES

La serpentinisation a provoqué la transformation des harzburgites et des dunites avec la néoformation des minéraux tels que la lizardite, lizardite-chrysotile, lizardite-antigorite et antigorite de manière accessoire, la serpophite, la bastite et des carbonates. Les chromospinelles sont transformés en magnétite, stichtite et parfois la brucite.

Dans les zones à fort autométamorphisme hydrothermal au niveau de secteur de Mechoui, les serpentines se transforment en listwénites, produit ultime du phénomène de la serpentinisation. Elles sont à compositions variables selon

l'intensité du métamorphisme, avec une association complète à carbonate, breunnerite, quartz, magnétite et fuschite avec des reliques d'antigorite et des chromospinelles.

Au contact avec les dykes, les gabbroïdes et les granitoïdes, les serpentines deviennent chloriteuse, avec de l'amiante en petits filonnets minces et dans des textures rubanées matérialisant l'avancement des fronts de métasomatose.

Les roches intrusives présentent également des empreintes des transformations métasomatiques aux contacts avec les serpentinites. Elles sont matérialisées par des franges de rodingites à vésuvianites et grenats sur des puissances centimétriques.

Certains filons et dykes sont entièrement transformés en giobertite et magnésite ([16]) comme dans le cas du massif d'Ambed et Ait Ahmane.

La serpentinitisation des ultrabasites a eu lieu avant la phase panafricaine B1 et s'est poursuivie durant cette phase ([1]). Durant la mise en place de la diorite, le métamorphisme de contact a induit la rodingitisation de la diorite et la talcification des serpentines. Il se développe une frange métasomatique métrique le long du contact constituant la roche hôte des minéralisations argentifères.

La carbonatation des serpentines a eu lieu en deux phases :

Une première carbonatation a eu lieu en relation avec les accidents majeurs B2. La serpentine est alors transformée en une carapace à quartz breunnerite et fuschite. La texture de la roche ne montre pas d'orientation préférentielle pouvant témoigner de la déformation B1. Toutefois, cette carbonatation fossilise les structures de la serpentine ce qui, à l'affleurement reflète des linéaments planaires semblables à une fabrique fossilisée par les altérations.

Ces formations sont recoupées par le Précambrien III et pourrait être synchrone du dépôt de Tiddiline.

La deuxième carbonatation est matérialisée par le développement des carbonates ferrifères. Ces derniers sont issus de la transformation des listwénites et la libération du manganèse concentré en liseré le long des fractures sous forme psylomélane.

Les altérations hydrothermales proprement dites sont associées aux filons minéralisés. Une silicification intense de la diorite en relation avec la bréchification hydraulique. Deux types de texture sont relevés. Une silicification sous forme de stockwerk à proximité du filon qui passe progressivement à une silicification quasitotale de la diorite aboutissant à des corps quartzeux de puissance métrique. Dans la zone à stockwerk, la diorite est hématitisée avec une séricitisation des plagioclases, les biotites se transforment en chlorite.

Ces altérations dessinent une zonalité par rapport au centre du filon, en effet, en allant vers les périphéries, la chloritisation est la plus dominante et s'associe spatialement à la zone à sulfures. La frange d'altération peut excéder 20 m dans les zones de convergence de plusieurs croiseurs.

Le stade ultime de cette altération correspond à une troisième phase de carbonatation à laquelle sont associés les arséniures. Les carbonates regroupent la dolomie et la calcite en cristaux idiomorphes bien développés. Le chlorite magnésien en rosettes occupe les interstices.

A l'échelle microscopique, la carbonatation des serpentines est se matérialise par : (i) Disparition progressive des minéraux serpentineux; (ii) Leur remplacement par le talc dans un stade intermédiaire ensuite; (iii) La progression de la calcite; (iv) Certains minéraux tels que la magnétite sont observés à tous les stades. (Fig.3).

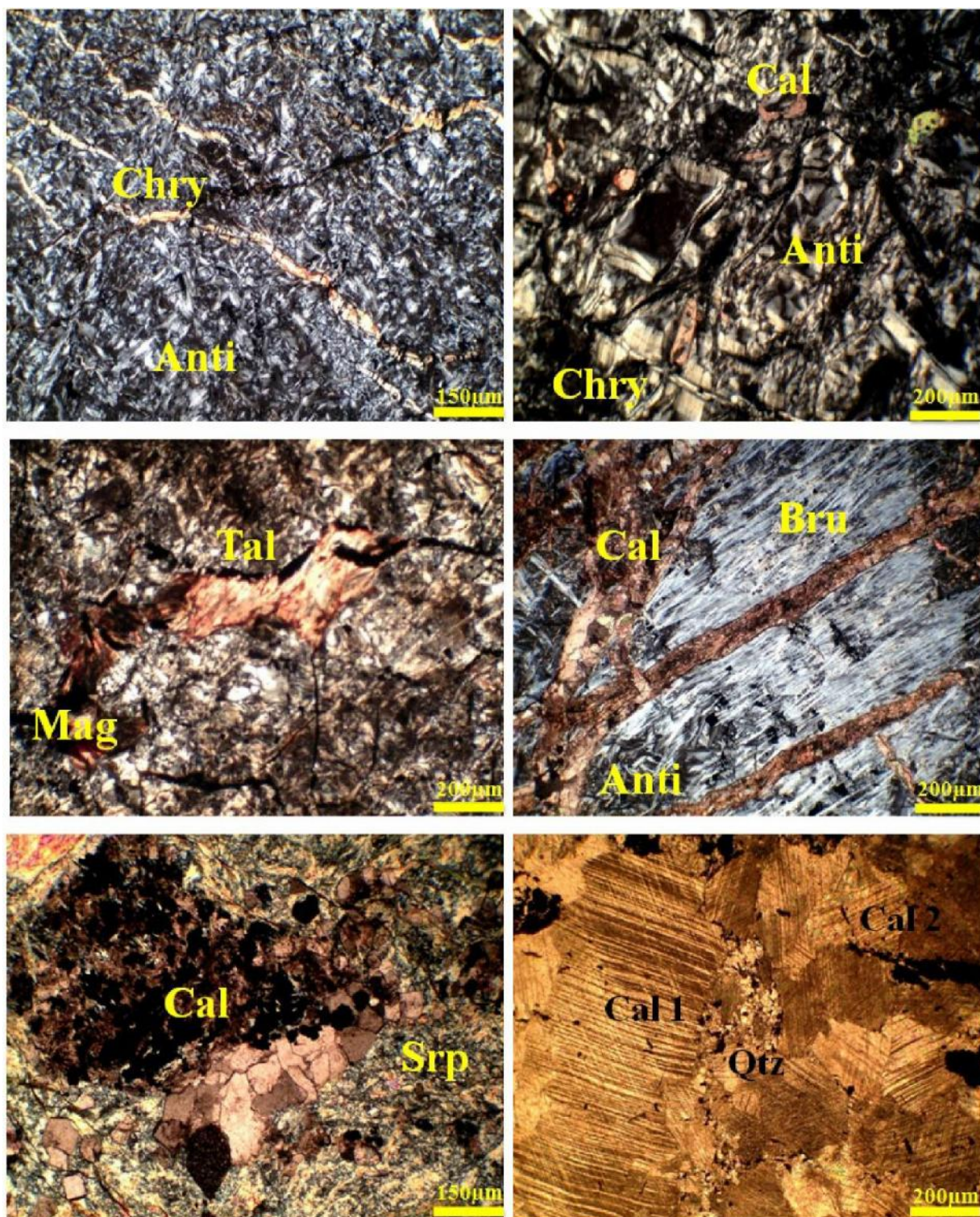


Fig.3 : Observations microscopiques des serpentinites encaissantes, des amas carbonatés et quartzo carbonatés (Anti : Antigorite, Chry : chrysotile, cal : calcite, Tal : Talc, Bru : Brucite, Mag : Magnétite, Srp : Serpentine, Qtz : Quartz)

5 L'IMPACT DE LA SERPENTINISATION SUR LES GISEMENTS DE COBALT, NICKEL ET CHROMITE

La distribution des structures minéralisées est contrôlée par une multitude de facteurs physiques et chimiques tant à l'échelle régionale qu'à l'échelle locale et la lithologie de la roche hôte constitue l'un de ces facteurs. A Bou Azzer, la quasi-totalité des minéralisations sont encaissées dans la diorite quartzique et les rhyolites du Précambrien III. En effet, et en combinant les drains et les amas de contact, la diorite encaisse 33 structures minéralisées avec 45% du volume utile global, la rhyolite en représente 51% avec 29 structures minéralisées et le reste entre les roches basiques les roches carbonatées de l'Adoudounien. Les espèces minérales ne suivent pas la même tendance comme le montre le tableau (Tableau.2).

Table 2. Répartitions des espèces minérales par gisement (wt %)

Gisement	Espèces minérales (%)			
	Smaltine / Skutterudite	Safflorite / Loëllingite	Sulfo-arséniures de Fer et de cobalt	
Mechoui	62	33	1	2
Bou-Azzer Est	65%	20		15
Filou II	98			1
Filou II Est	98			1
Filou 7/5	75	20	1,3	2,5
Aghbar	65,2	31,8		3
Tamdrost	67,3	32,7		
Bouismas	42,2	57,6		0,15
Ait Ahmane	47,8	50		2,2

En effet, la famille de la Smaltine / Skutterudite domine au centre de la boutonnière en regard de la loëllingite qui a tendance à se développer vers l'Est. Pour les sulfoarséniures, ils sont particulièrement élevés à Bou Azzer Est et très faiblement à Bouismas. (Fig.4).

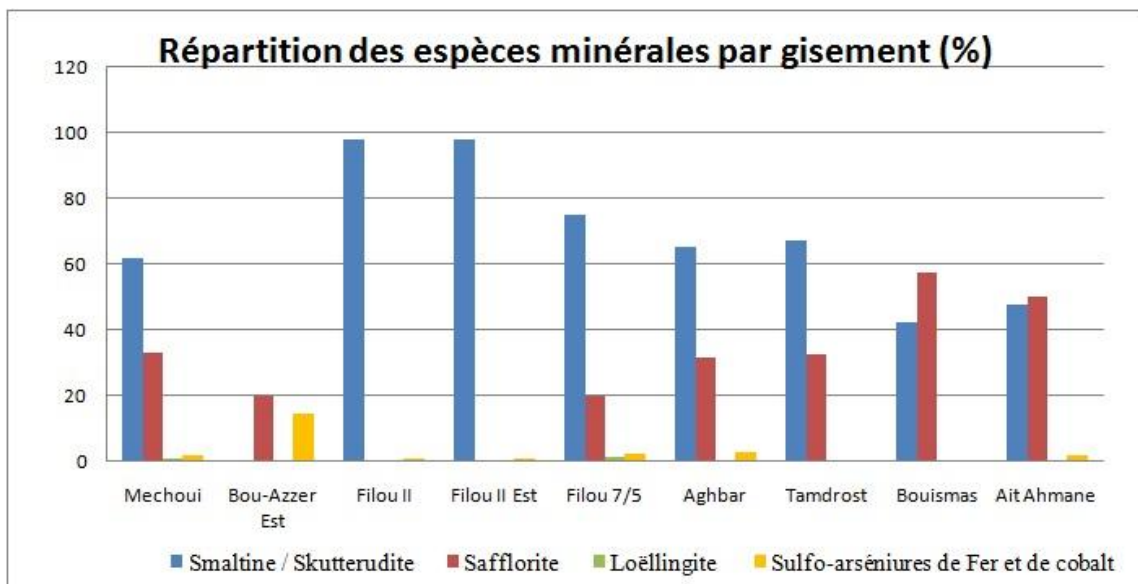


Fig.4 .Diagramme montre la répartition des espèces minérales par gisement à l'échelle de Bou Azzer (wt %)

D'une manière générale, la skutterudite (CoAs_3) est le minéral porteur de la grande partie du cobalt de Bou Azzer. Sa teneur intrinsèque en cobalt varie de 7,6% à 27,81%. Une zonalité entre les gisements se dessine en allant de l'ouest en Est. Les gisements de la partie ouest sont plus riches en cobalt (Figure 5, A). Cette teneur baisse à partir du gisement d'Aghbar jusqu'à Ait Ahmane. Il en va de même pour l'or qui est associé au cobalt et dont le contenu métal est plus important dans les

gisements de l'ouest de la boutonnière. Il est également à signaler que sa teneur en nickel augmente aux dépens de cobalt en s'approchant des serpentines. Le fer est aussi corrélé négativement au cobalt dans la skuttérodite.

Pour la cobaltite, la teneur en cobalt oscille entre 15,71% et 32,78%. La moyenne s'établit à 28,40% en cobalt (Figure 5, B). Elle suit une tendance opposée à celle de la skuttérodite en termes de zonalité. En effet la cobaltite des gisements Est est appauvrie en cobalt. Sur un autre plan et en fonction du chimisme, trois types de cobaltite ont été répertoriées. La cobaltite nickélifère pour la quelle la teneur en nickel atteint 13%. Une cobaltite aurifère dans laquelle la teneur en cobalt est également faible et la troisième qui correspond au pôle cobaltifère. De ce fait, le cobalt et le nickel sont corrélés négativement dans la cobaltite (Figure 5, C et D).

Pour ce qui est de la série löellingite-safflorite, la teneur en cobalt varie entre le pôle purement ferrifère à plus de 24% en cobalt. Des variétés nickélifères ont été également révélées surtout pour les löellingites.

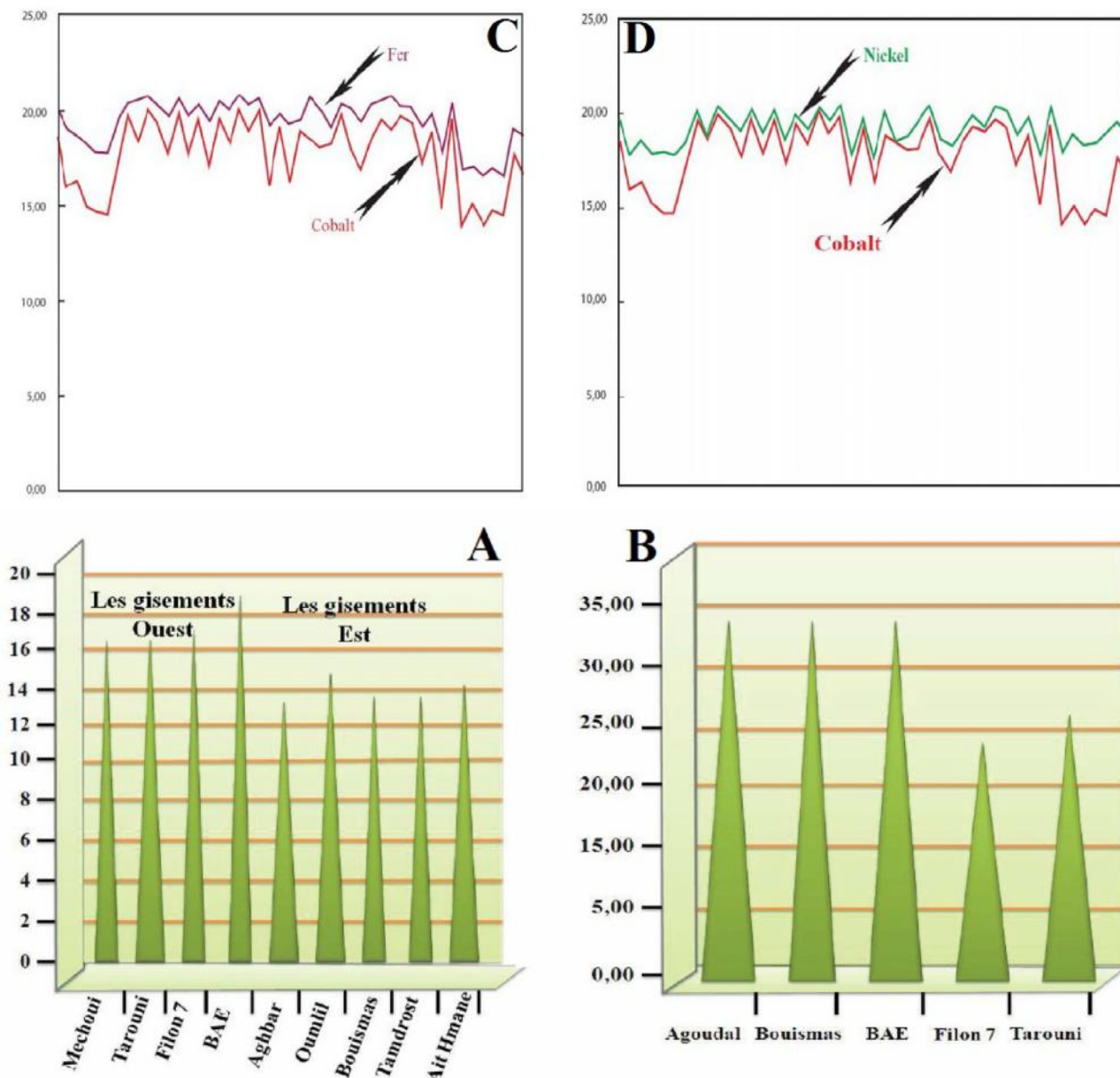


Fig.5. A : Evolution de la teneur de la skuttérodite en wt% des gisements de Bou Azzer de l'Ouest à l'Est ; B : Evolution de la teneur de la cobaltite en wt% des gisements de Bou Azzer de l'Ouest à l'Est ; C : variation des teneurs en Cobalt et en Fer dans la Skuttérodite dans Bou Azzer Centre ; D : variation des teneurs en Cobalt et en Nickel dans la Skuttérodite dans Bou Azzer Centre)

5.1 LE ROLE DE LA SERPENTINISATION SUR LES MINERALISATIONS COBALTIFERES :

En fonction de la composition de l'olivine solution solide entre la forstérite à magnésium et la fayalite pôle ferrifère, les réactions qui régissent la serpentinisation sont les suivantes :

- Fayalite+eau→magnétite +aqueuse silice +hydrogène ($3\text{Fe}_2\text{SiO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + 3\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2$)
- Forstérite+ silice aqueuse →serpent e ($3\text{Mg}_2\text{SiO}_4 + \text{SiO}_2 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)
- Forstérite+eau→serpentine brucite ($2\text{Mg}_2\text{SiO}_4 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + \text{Mg}(\text{OH})_2$)

Cette dernière réaction décrit l'hydratation de l'olivine avec de l'eau seulement pour donner la serpentine et la brucite $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Après la réaction, les produits à faibles solubilités (silice aqueuse ou des ions magnésium dissous) peuvent être transportés au-delà de la roche par diffusion ou advection. En présence de dioxyde de carbone, la serpentinisation produit la magnésite (MgCO_3) ou générer du méthane (CH_4) selon les équations suivantes :

- A faible concentration de CO_2 et un pôle ferrifère de l'olivine
(Olivine + eau + acide carbonique → serpentine + magnétite + méthane)
- Si l'olivine est fortement magnésienne on obtient :

(Olivine +eau + acide carbonique → serpentine + magnétite + magnésite + silice)

La serpentinisation est en fonction de la composition des roches ultramafiques magmatiques, le chimisme du fluide et le système ouvert ou fermé du processus. Dans le cas de Bou Azzer, les pyroxènes sont aussi serpentinisés. Les olivines contiennent du nickel et du cobalt à des teneurs respectives de 3900 et 200 ppm. Le fluide est probablement chargé en calcium et en magnésium comme en témoignent les dépôts de la magnésite et des masses de listwénites.

Dans ces conditions, la serpentinisation se serait produite dans un système ouvert avec apport de l'acide carbonique, du calcium et de l'eau (**Fig.6**). En plus de la serpentine et de la magnétite, ils se forment des carbonates de calcium et de magnésium ainsi que des carbonates de nickel et de cobalt. Le stock en cobalt est finalement reconcentré dans minéraux facilement lixiviables comme la magnétite et les carbonates. L'action des fluides hydrothermaux et l'apport de l'arsenic des sédiments et du soufre des saumures vont conduire à sa reconcentration sous forme d'arséniures, sulfo-arséniures et sulfures.

En ce qui concerne la partie du nickel et du cobalt associés aux sulfures, la serpentinisation a également joué un rôle important dans sa redistribution et en concomitance avec la transformation de l'olivine. Généralement, les roches ultramafiques non altérées peuvent renfermer des sulfures magmatiques, telles que la pyrrhotite, la pentlandite et la chalcopyrite. Les différences de compositions minéralogiques entre les roches ultra-mafiques non altérées et celles transformées en serpentines suggèrent un contrôle de la minéralogie des sulfures secondaires de Ni-Co-Fe-S par les réactions chimiques intervenant lors de la serpentinisation. Les assemblages minéraux des sulfures secondaires de ces métaux dépendent du degré de serpentinisation. Une serpentinisation partielle dans laquelle l'olivine est transformée en serpentine, magnétite et pentlandite avec le transfert chimique du contenu en cobalt, nickel et fer. La pyrrhotite primaire monoclinique et la pentlandite sont transformées en pyrrhotite hexagonale, mackinawite et la magnétite avec une redistribution des concentrations en fer, soufre, nickel et cobalt. Dans certains cas, la mackinawite est absente et peuvent apparaître des minéraux de heazlewoodite et de godlevskite. Il est aussi possible que la pyrrhotite secondaire soit monoclinique ou même absente. Dans le cas de Bou Azzer, la serpentinisation est totale et les phases minérales secondaires sont différentes. Elles regroupent la polydymite, la millerite et l'orcélite.

Dans la magnétite, la proportion pondérale du cobalt varie de 6,74 à 8,5%. La polydymite contient 50,86% de nickel et 4,38 % en cobalt. Elle contient des inclusions d'orcélite dont les analyses ont révélé 60,81% poids en nickel. La millerite est aussi cobaltifère avec des teneurs respectives de 57,77% en nickel et le cobalt qui s'échelonnent entre 3,13 et 5,36%.

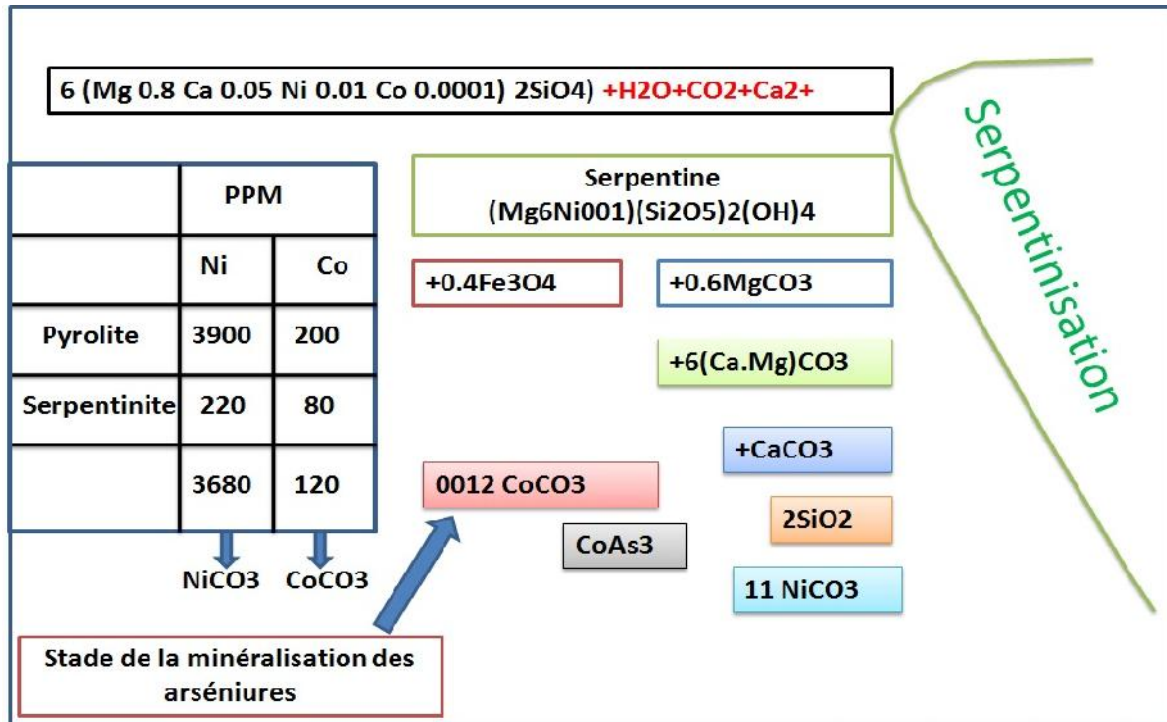


Fig.6. la mobilité du cobalt et Nickel dans le processus de la serpentinisation

5.2 LE ROLE DE LA SERPENTINISATION SUR LES MINERALISATIONS MAGMATIQUES

5.2.1 LA CHROMITE

Les gisements de chromite podiformes associés aux ophiolites de Bou Azzer sont concentrés dans la partie Est de la boutonnière. Ils se présentent sous forme de petits corps losangiques orientés et à la croisée d'un système de fractures traduisant leur mode de mise en place. La tectonique qui affecte ces corps est polyphasée. La phase synchrone à leur mise en place est transtensive et en témoignent les formes de « pulls aparts » commune aux pods.

A une échelle microscopique, la chromite est souvent xénomorphe à subautomorphe en grains millimétriques, disséminée ou en îlots multigranulaires, souvent associée à la magnétite notamment dans la région d'Inguijem et Talc. Les grains de chromite sont généralement altérés, ou fracturés et sont cernés par des liserés et des auréoles de chlorite et de stichtite (carbonate de chrome et de magnésium, hydraté).

Deux catégories de chromitites sont remarquables microscopiquement selon le degré de déformation. Certaines chromitites sont peu déformées, où les nodules aplatis montrent une direction (S₀) perpendiculaire à la direction d'aplatissement des nodules. D'autres chromitites sont plus déformées, et montrent généralement deux directions qui se superposent. Une direction précoce (S₀) mimant un clivage et parallèlement laquelle s'alignent parfois des inclusions silicatées. Cette direction limitée aux cristaux de chromite paraît antérieure à la serpentinisation et serait magmatique. Une direction tardive (S₁) qui (S₀) et traverse l'ensemble de la chromitite. Cette dernière direction se manifeste par une fracturation en pull à part des chromitites massives, qui montrent des contours rectilignes ou en dents de scie témoignant d'une dissolution tardive. Elle est représentée par des fractures ouvertes remplies de minéraux serpentineux et serait contemporaine à la serpentinisation.

A Bou Azzer, la serpentinisation est accompagnée par la formation de la magnésioferrite et également par la transformation dans certains cas de la chromite en magnésiochromite. De la chalcopyrite, la millérite, la bravoïte et d'autres alliages de Ni-Co sont également observés, au cœur des minéraux serpentineux des ultramafites de Bou Azzer (Fig.7.a). La magnétite (Fe²⁺Fe₂³⁺O₄) et la magnésioferrite (Mg²⁺Fe₂³⁺O₄) sont fréquentes dans les serpentinites de Bou Azzer. Elles forment des liserés d'altération coronitique autour de la chromite et la magnésiochromite, et soulignent des plans de schistosité ou de cisaillement dans les tectonites, ce qui témoigne de leur caractère secondaire. Elles sont associées à la

serpentine, dont elles sont contemporaines. Le Fer nécessaire à la formation de ces deux minéraux est sans doute lié à la serpentinisation.

Les relations texturales relevées au MEB (microscope électronique à balayage) entre les minéraux serpentiniteux et les cristaux de chromites stipulent une serpentinisation précoce synchronisée de la mise en place des pods de chromite (**Fig.7.b**).

Les chromitites de Bou Azzer se caractérisent par un faible rapport [P-PGE / I-PGE] typique des chromitites ophiolitiques de type alpin, pauvres en sulfures, avec prédominance des I-PGE, des teneurs variables en Rh, et de faibles teneurs en Pt et Pd. [19]. La somme des teneurs en (PGE) des chromitites d'Inguejjem-Ait Ahmane est d'environ 187-221 ppb.

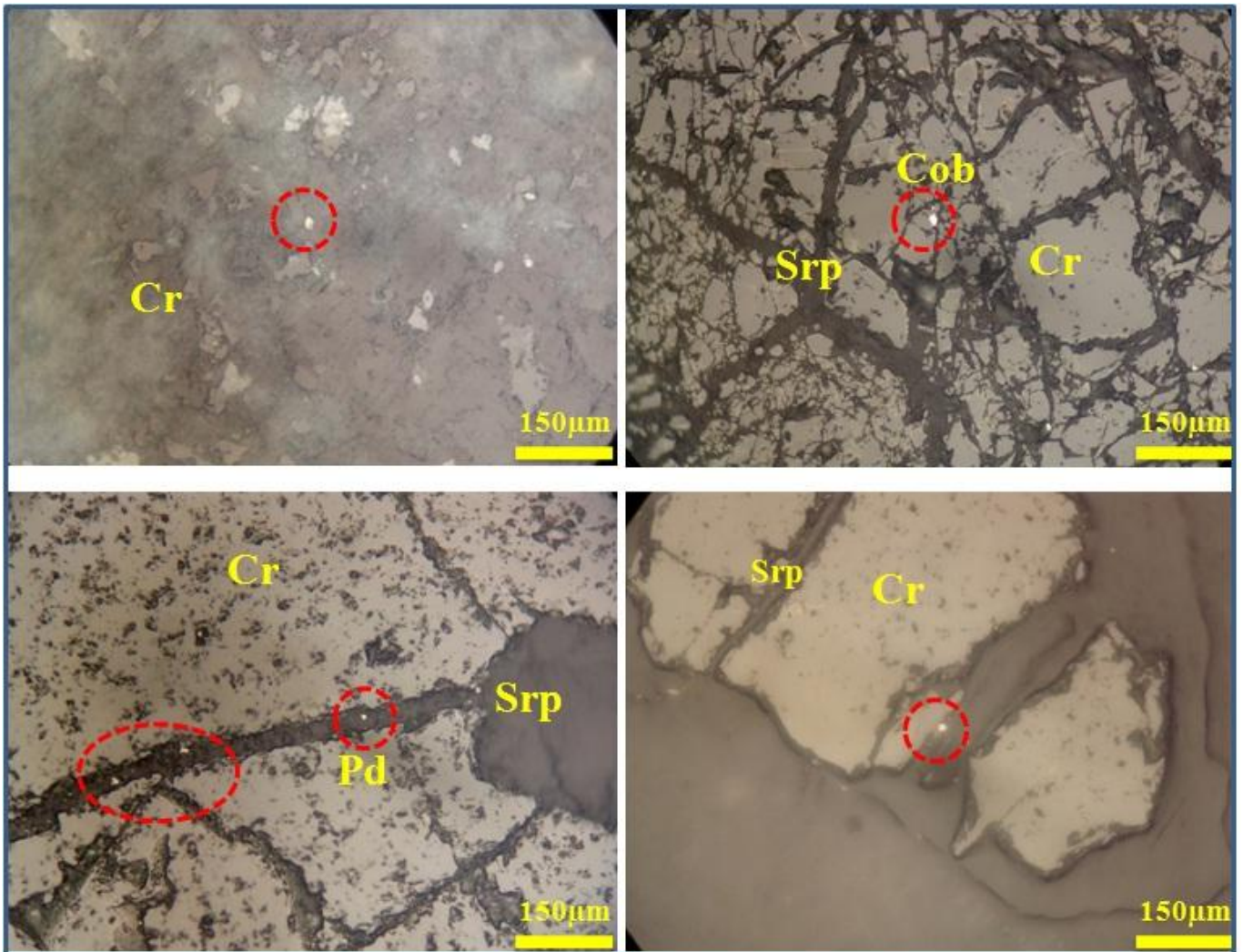


Fig.7.a.: Microphotographie montre des alliages de Ni-Co qui sont observés, au cœur des minéraux serpentiniteux (Cr : chromite, Srp : serpentine, Pd : pentlandite, cob : cobaltite)

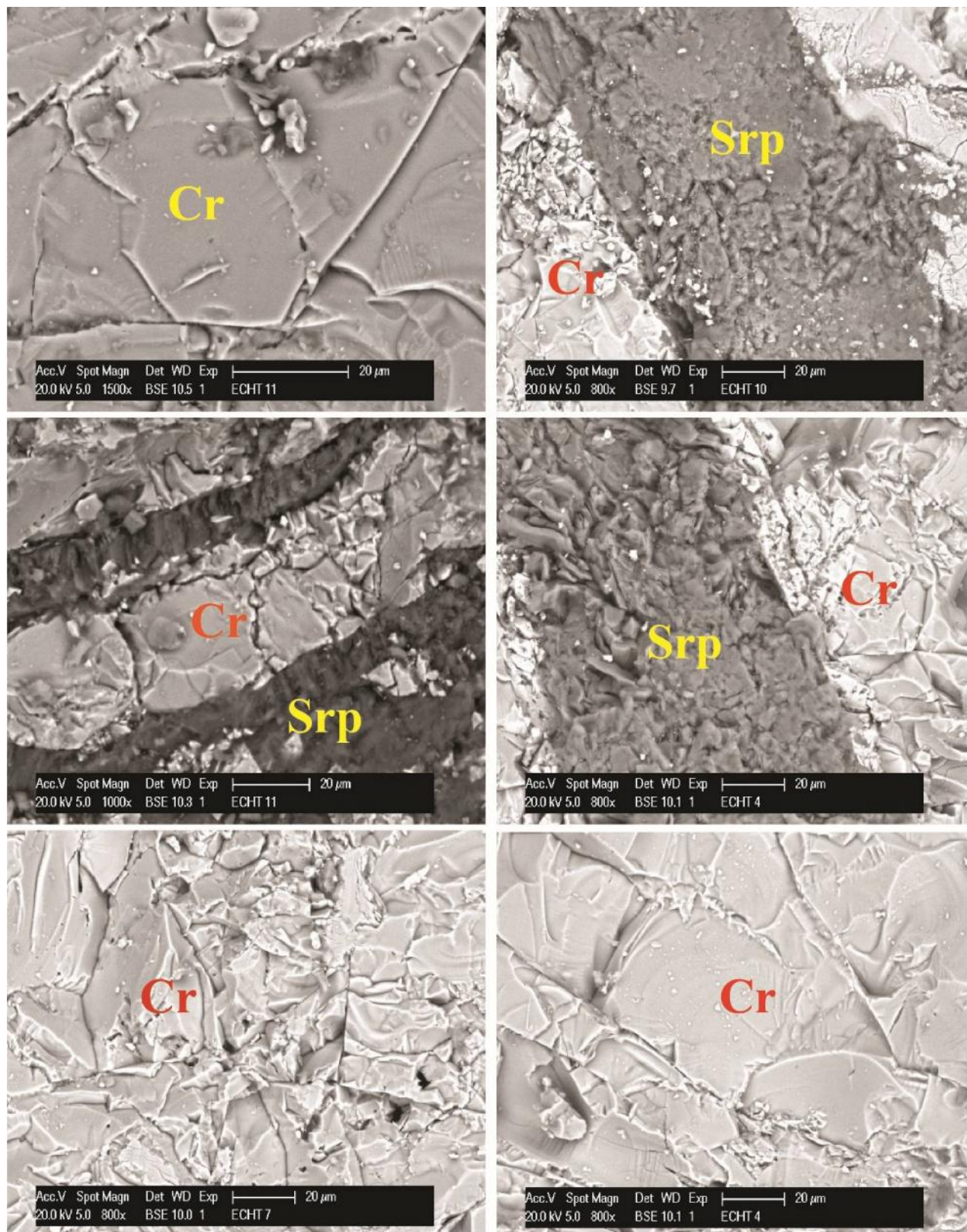


Fig.7.b. Microphotographie montre les relations texturales relevées au MEB (microscope électronique à balayage) entre les minéraux serpentineux et les cristaux de chromites (Cr : chromite, Srp : serpentine)

5.2.2 LES SULFURES DE NICKEL

A Bou Azzer, le Nickel est exploité comme un sous produit de cobalt et fait partie intégrante de la paragenèse minérale sous forme des arséniures, des sulfo-arséniures et des sulfures comme décrit dans les chapitres précédent. Durant son histoire, Bou Azzer aurait produit plus de 3000 tonnes métal de nickel. Le modèle génétique établi est identique à celui du cobalt, selon lequel le nickel proviendrait de la serpentine par effet des altérations successives qui l'ont affectées depuis la serpentinitisation jusqu'aux altérations exogènes qui se sont succédées. Le filon 51 est un cas de gisement à Nickel dominant et le cobalt en sous produit.

Un autre type de Nickel a été mis en évidence et correspond à la garniérite issue des altérations météoriques des serpentines et concentrée localement dans la carapace d'Ambed mais sans valeur économique. Par ailleurs, les études géochimiques réalisées sur le massif des serpentines par le service géologique de la Compagnie minière de Tifnoute Tiranimine (CTT-Bou Azzer) a révélé des teneurs élevées qui dans certains cas sont comparables à certains gisement exploités dans le monde et peuvent atteindre 0.27 % avec le chrome pour une teneur moyenne de 14%. Les superficies minéralisées sont de grandes extensions et dépassent plusieurs milliers de m². Les secteurs les plus minéralisés sont au niveau du secteur Ambed et Ait Ahmane mais également à Bou Azzer Est et à Aghbar. Les espèces minérales porteuses du nickel identifiées dans les massifs de serpentinite sont:

- La Polydymite cobaltifère (NiNi₂S₄) :

Au microscope métallographique la polydymite se présente sous forme de petites plages à contours irréguliers et de taille pouvant atteindre 60μ x 50μ. En lumière naturelle, cette polydymite présente une couleur jaune (**Fig.8, A**). En lumière polarisée, certaines plages de polydymite correspondent à des agrégats formés de plusieurs grains.

L'analyse chimique ponctuelle semi quantitative réalisée sur la polydymite, à l'aide du MEB, est représentée par le spectre (**Fig.9**) et par la composition chimique pondérale et atomique correspondante.

L'examen du résultat de ce pondérale en nickel de cette polydymite remarquable du cobalt, avec une proportion de une substitution de Co à Ni et confère ainsi à cette polydymite, un caractère cobaltifère.

En peut trouver aussi une association intime entre la polydymite cobaltifère et la magnétite cobaltifère. En effet ces phases minérales sont généralement regroupées en agrégats (**Fig.8, B**). Certains grains de polydymite peuvent contenir de la magnétite sous forme de fines inclusions (**Fig.8, C**). Les agrégats formés de polydymite et de magnétite peuvent prendre différentes formes.

Ces agrégats de polydymite et de magnétite correspondant à un assemblage minéral secondaire, peuvent résulter de la transformation lors de la serpentinitisation d'agrégats minéral d'origine magmatique composé initialement de pentlandite et de pyrrhotite.

La polydymite peut aussi trouvée libre dans les minéraux de la serpentine (**Fig.10, A**) est rarement associée à la magnétite cobaltifère avec laquelle elle peut former des agrégats.

Les grains de polydymite présentent souvent des contours capricieux et une taille variable entre quelques microns et quelques dizaines de microns, La magnétite est également assez abondante et se présente sous forme de grains aux contours irréguliers. (**Fig.10, B**). Les grains de magnétite peuvent indiqués un caractère cobaltifère ou plutôt un caractère nickélique (**Fig.10, C**).

L'analyse chimique ponctuelle réalisée au MEB sur différents grains de polydymite indique une proportion pondérale du nickel variable entre 56.11 wt% Ni et 50.98 wt% Ni. La composition pondérale du cobalt est comprise entre 5.48 wt% Co et 5.87 wt% Co

- L'Orcelite (Ni_{5-x}As₂)

Au microscope métallographique, en lumière naturelle, l'orcelite présente une teinte blanc rosâtre. En lumière polarisée, elle présente une faible anisotropie. L'analyse chimique ponctuelle semi quantitative réalisée au MEB (microscope électronique à balayage) montre une proportion en nickel de 60.81 wt% Ni (**Fig.11**).

La magnétite :

L'examen réalisé au microscope métallographique montre une présence en quantité appréciable de magnétite. Cette dernière se présente sous forme de grains de taille micrométrique (**Fig.10, D**). Un autre type de magnétite se développe au niveau des contours et dans les fractures des phénocristaux du chrome-spinelle (**Fig.10, E**).

- La magnétite nickélifère et chromifère :

La magnétite se développe au détriment du chrome-spinelle. Cette magnétite clairement secondaire se localise dans les microfissures recoupant les grains du chrome-spinelle et dans les bordures de ces grains (**Fig.10, F**). L'analyse chimique ponctuelle semi quantitative réalisée au MEB, indique une teneur en nickel variable entre 9.60 wt% Ni et 11.51 wt% Ni (**Fig.12**). Le chrome est présent à une teneur échelonnée entre 2.03 et 7.73 wt% Cr.

- Chrome-spinelle nickélifère :

Le chrome-spinelle est présent sous forme de grains épars dans le La taille des grains varie de quelques μm à 0.5mm (**Fig.8, D**). L'analyse chimique ponctuelle semi quantitative réalisée au MEB, montre la présence du nickel et du zinc avec des proportions significatives. La composition pondérale en zinc varie entre 3.04 et 8.80 wt% Zn. Le nickel est détecté à une teneur de 1.55 wt% Ni (**Fig.13**).

- La Millerite (NiS) :

L'analyse chimique ponctuelle réalisée à l'aide du MEB a permis de se rendre compte la présence de la millerite cobaltifère. Dans cette dernière le nickel présente une proportion comprise entre 58.91 wt% Ni et 62.62 wt% Ni (**Fig.14**). Le cobalt rentre avec une teneur échelonnée entre (3.13 wt% Co et 4.67 wt% Co).

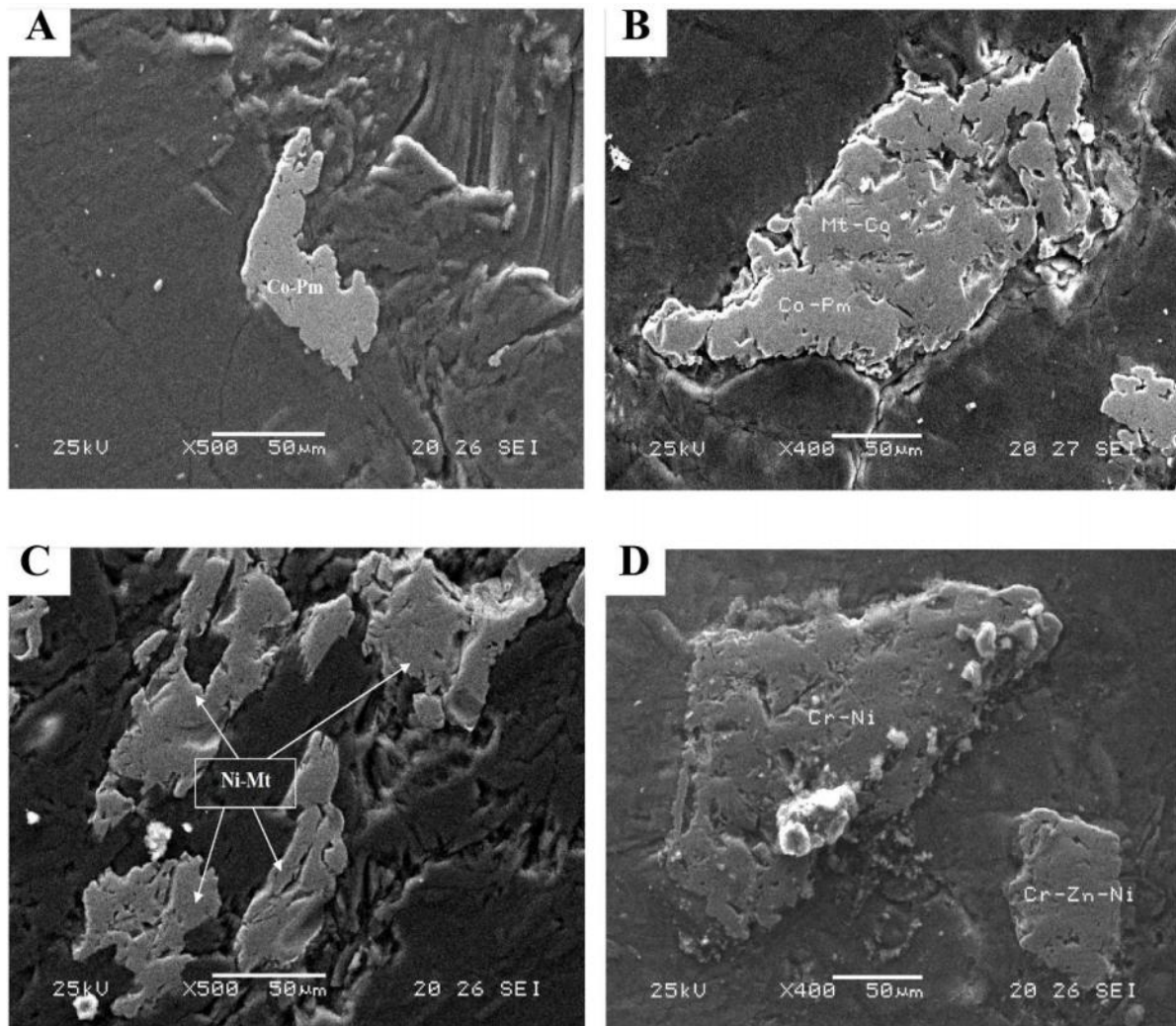


Fig.8. Les espèces minérales porteuses du nickel identifiées dans les massifs de serpentinite par microscope électronique à balayage (Co-Pm : Polydymite cobaltifère, Mt-Ni : Magnétite cobaltifère, Cr-Ni : magnétite chromifères et Nickélifères, Ni-Mt : magnétite nickélifère, Cr-Zn-Ni : Chrome-spinelle zincifère et nickélifère)

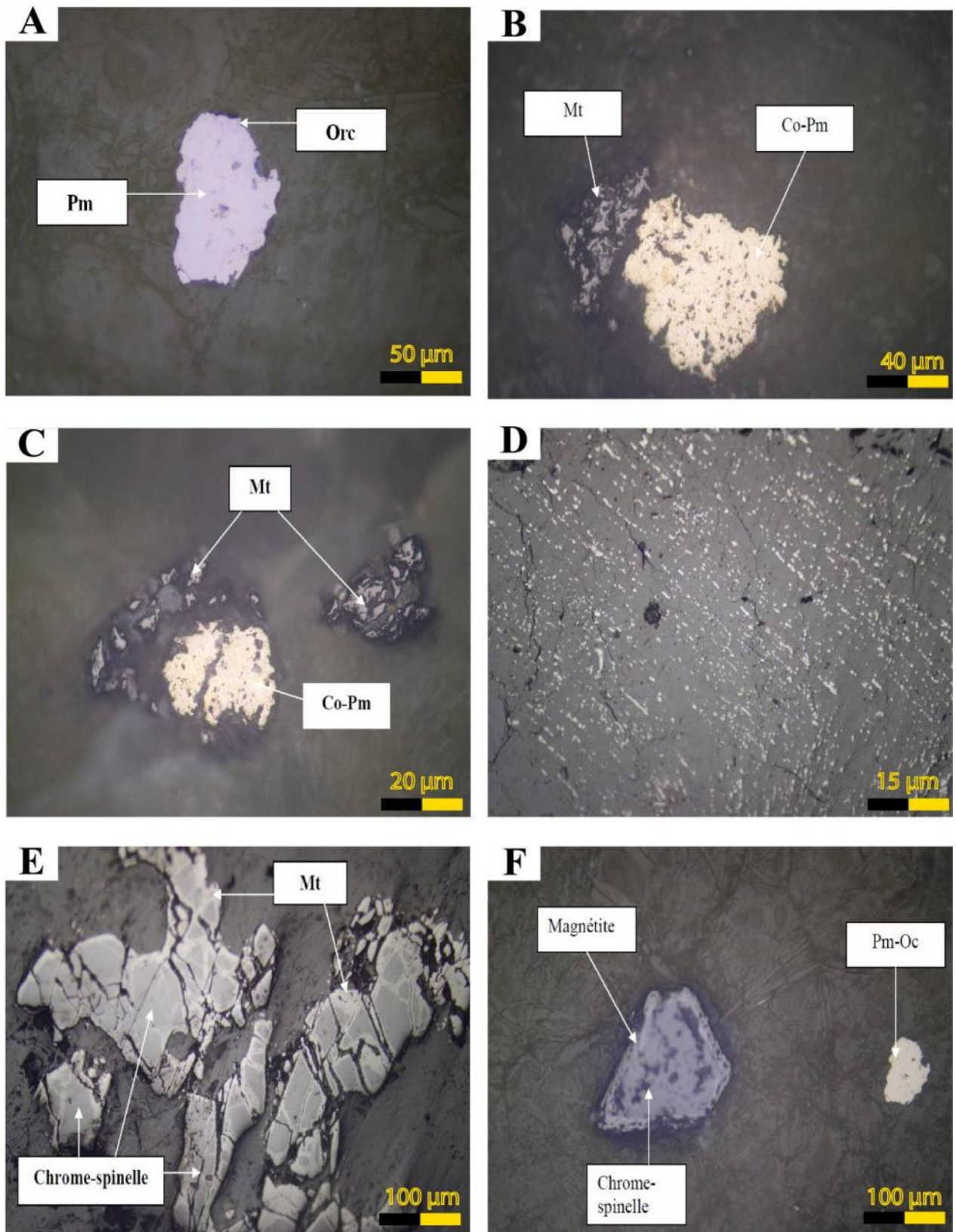


Fig.10. Observations métallographiques des espèces minérales porteuses du nickel identifiées dans les massifs de serpentinite (Pm : Polydymite, Orc : orcelite, Mt : Magnétite, Co-Pm : Polydymite cobaltifère).

A la lumière des données acquises à l'issue de l'étude minéralogique, nous retenons les faits marquants suivants :

La détection du nickel dans la polydymite (50,86 wt% Ni) cobaltifère (4.38 wt% Co), dans le Chrome-spinelle nickélicifère (1.55 wt% Ni), dans la magnétite nickélicifère (jusqu'à 11 wt% Ni) en dans l'orcélite (60.81 wt% Ni), correspondant à un arséniure de Ni.

L'association intime entre la polydymite cobaltifère et la magnétite cobaltifère : Ces agrégats de polydymite et de magnétite correspondant à un assemblage minéral secondaire, peuvent résulter de la transformation lors de la serpentinisation d'agrégats minéral d'origine magmatique composé initialement de pentlandite et de pyrrhotite.

L'identification de polydymite cobaltifère, millerite cobaltifère, magnétite nickélicifère et magnétite cobaltifère et abondance remarquable des grains de polydymite.

La formation de toutes ces phases minérales porteuses de nickel est contemporaine de la serpentinisation des roches ultrabasiques du complexe ophiolitique de Bou Azzer. La roche hôte est profondément serpentinisée.

Ces phases nickélicifères sont formées par remplacement d'une paragenèse primaire d'origine magmatique, et constituée très fort probablement de pentlandite, de sulfures de Fe (pyrrhotite et/ou pyrite). Un processus identique est plausible dans le massif d'Ambed, où existe occasionnellement des grains de pentlandite. Dans tous les gisements où elle est connue, l'orcélite est le seul arséniure de Ni stable pendant la serpentinisation : elle cristallise généralement au dessous de 400-450 °C aux dépens d'une paragenèse primaire à nickéline + maucherite (Ni₁₁As₈).

La fréquence relative de la maucherite dans les péridotites initialement équilibrées au sein du manteau supérieur souligne l'importance de l'arsenic dans les fluides d'origine mantellique. Les valeurs de l'activité de l'arsenic ont pu être localement aussi élevées que celle du soufre pour former un liquide immiscible riche en As, à l'origine des paragenèses riches en As de haute température. A une température inférieure à 400-450 °C ([17]). La serpentinisation des roches ultrabasiques encaissantes conduit à la remobilisation de S, Fe, Ni et Co inclus dans la paragenèse primaire magmatique. L'assemblage sulfuré varie avec le degré de serpentinisation de : pyrrhotite+pentlandite à pentlandite+heazlewoodite+godlevskite aux stades plus avancés, pentlandite+polydymite (ou violarite), pentlandite+polydymite+millerite et polydymite+millerite.

L'assemblage minéral nickélicifère identifié dans les massifs d'Aghbar et de Bou Azzer Est complètement serpentinisés, composé essentiellement de polydymite+millerite+ magnétite pourrait provenir du remplacement lors de la serpentinisation d'une paragenèse minérale primaire formée en plus de l'olivine d'agrégats de pentlandite+pyrrhotite.

D'une manière homogène, les minéralisations sont associées aux roches ultrabasiques incluent i) les minéralisations de nickel disséminées dans les termes de la zone de transition de la série ophiolitique ii) les gisements de chromite podiformes et les PGE associés iii) les minéralisations à or et palladium de Bleida Far-West encaissées par des roches basiques des cumulats iv) les minéralisations filoniennes hydrothermales de cobalt, nickel, arsenic et or de Bou Azzer. La genèse de ces minéralisations est le résultat de plusieurs processus hydrothermaux et tectono-magmatiques superposés.

Des minéralisations magmatiques précoces associées au fractionnement magmatique regroupent les minéralisations primaires de nickel, chrome ([13], [14], [22]) et PGE ([19], [20]).

Des minéralisations hydrothermales antémétamorphiques à sulfures, arséniures et oxydes synchrones de la serpentinisation sous l'influence combinée des fluides hydrothermaux tardifs et des eaux marines probablement chargées d'arsenic lessivé des sédiments avoisinant .

Des phénomènes supergènes intermittents qui concentrent les minéralisations de stichtite et de garniérite.

Une époque métallogénique tardi-panafricaine productrice du cobalt, arsenic, nickel et or en relation avec les phénomènes du doming des non métamorphique.

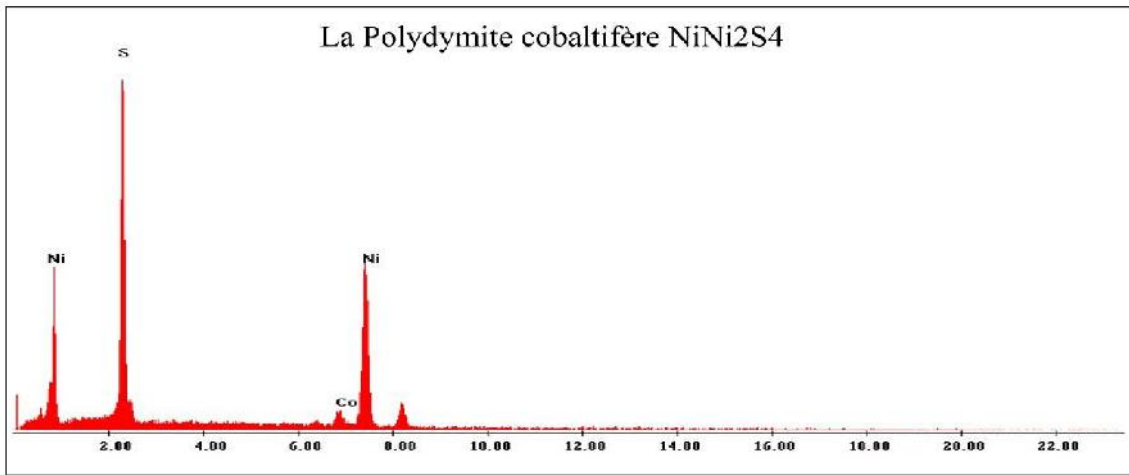


Fig.9. le spectre de la Polydymite cobaltifère NiNi₂S₄

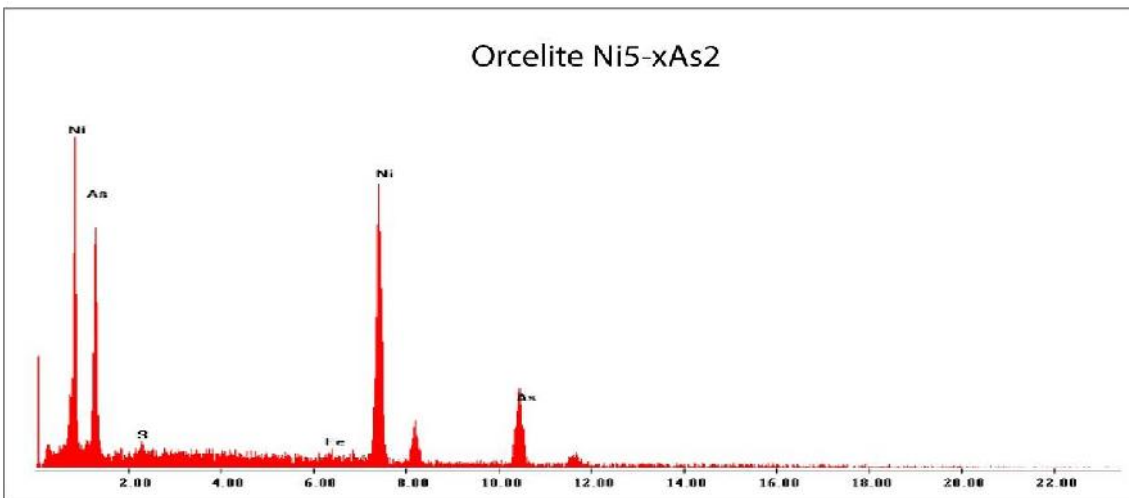


Fig.11. le spectre de l'Orcelite Ni_{5-x}As₂

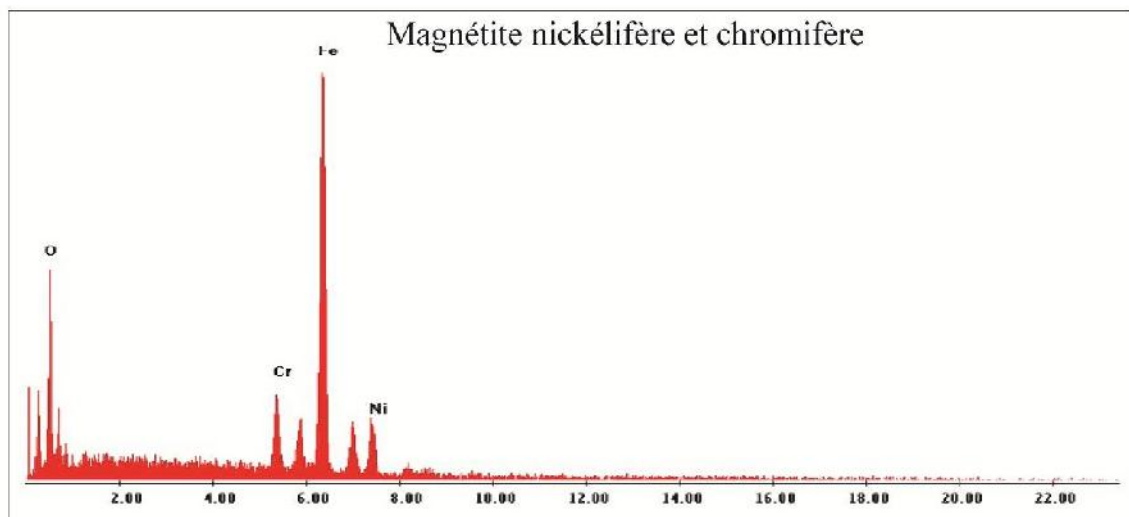


Fig.12. le spectre de la Magnétite nickélifère et chromifère

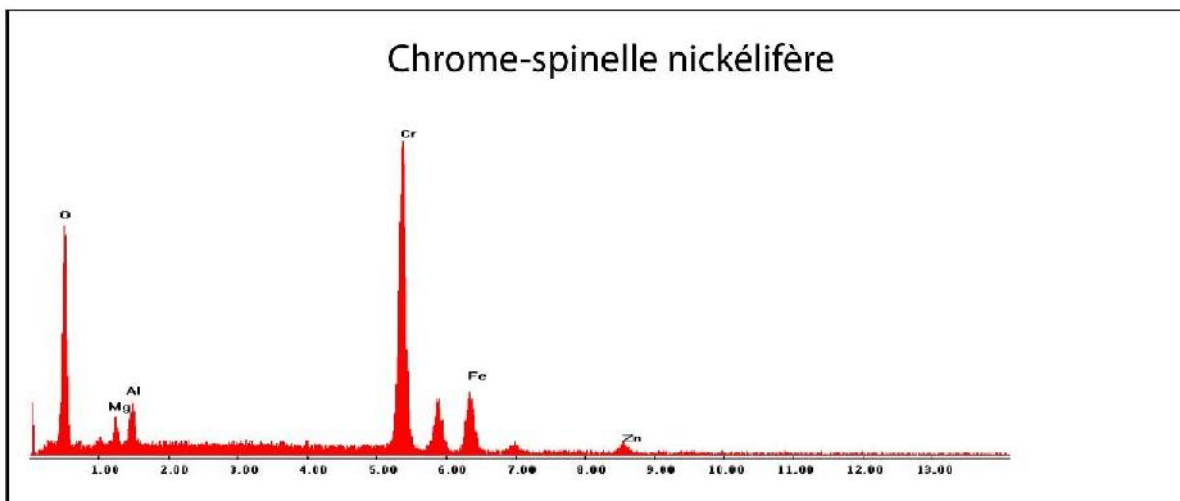


Fig.13. le spectre de Chrome-spinelle nickélifère

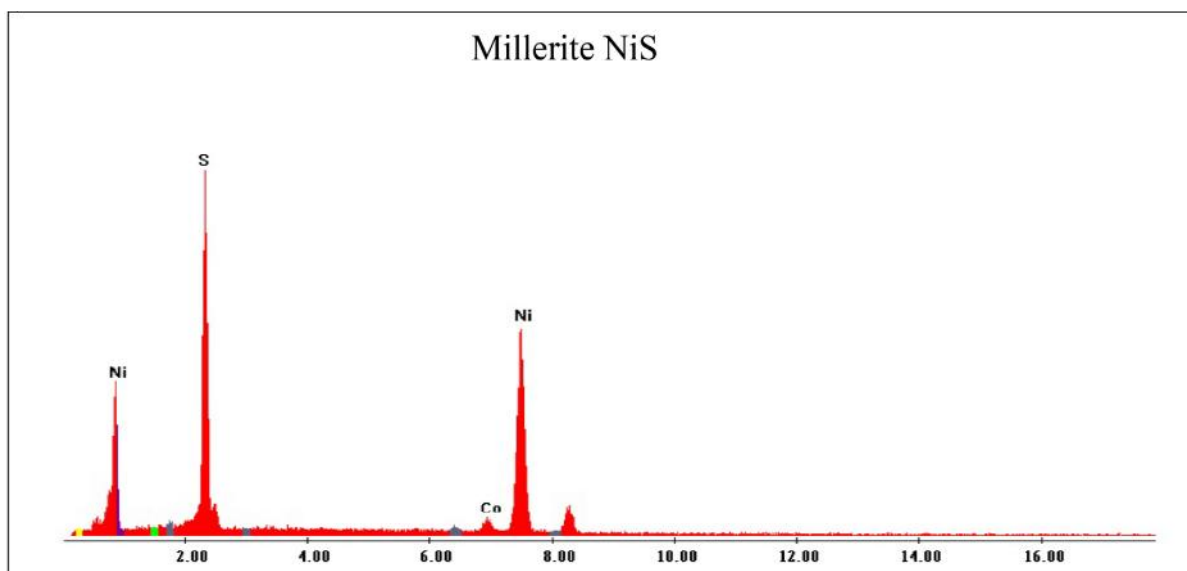


Fig.14. le spectre de la Millerite NiS

Pour la boutonnière de Bou Azzer, le scénario proposé est comme suit (Fig. 15) :

Un assemblage primaire d'origine magmatique : (Pyrrhotite, pentlandite et la chromite) (Fig. 15 : A, B et C)

La serpentinisation : l'assemblage primaire d'origine magmatique varie suivant le degré de serpentinisation vers un autre assemblage de polydymite, millérite, orcélite et magnétite. (Fig. 15 : D, E et F)

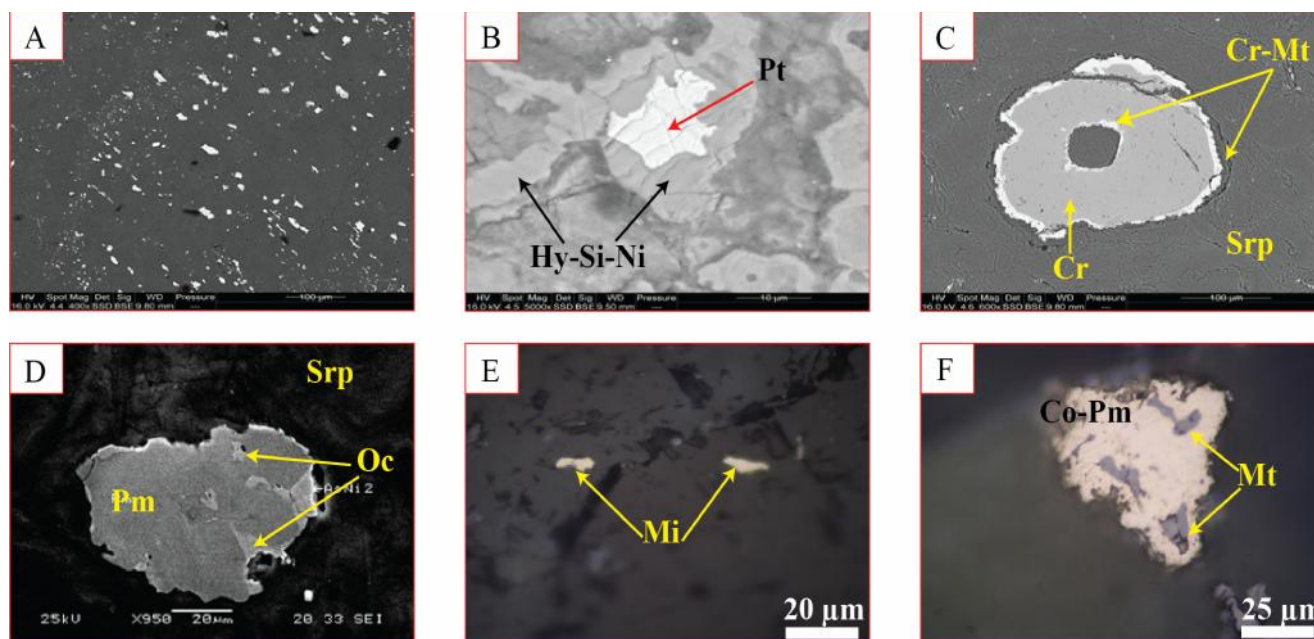


Fig.15. (A, B et C: Assemblage à Pentlandite (41,5 à 40,5 wt% Ni), Chromite (28 à 37 wt% Cr). (D, E et F: Assemblage à Polydymite, millérite, orcellite et magnétite).

6 CONCLUSION ET DISCUSSION

Toutes les hypothèses proposées pour les minéralisations de Bou Azzer placent le phénomène de serpentinisation au cœur des processus de genèse, toutefois avec des divergences majeures. ([21]) a associé le cobalt à la serpentine et considère un événement hydrothermal hercynien dans lequel l'arsenic, le CO₂ et la silice proviendraient d'une origine profonde. ([11]) considère que l'origine du cobalt est dans la serpentine, la magnétite et certains niveaux riches en sulfures. Il propose un premier dépôt du cobalt sédimentaire dans des chenaux en relation avec la carapace d'Ambed, qui aurait été reconcentré par des phases tectoniques postérieures plus particulièrement à l'Hercynien.

La paragenèse primaire d'origine magmatique est à pentlandite, chromospinnelle et magnétite cobaltifère et/ou nickélifère, elle est probablement associée aux sulfures de Fe (pyrrhotite et/ou pyrite) ([13], ([14], [18], [22], [23], [24]). Par ailleurs, l'assemblage minéralogique identifié est composé essentiellement de minéraux secondaires de polydymite cobaltifère, millerite cobaltifère, orcellite et magnétite cobaltifère et nickélifère. Ces phases pourraient provenir du remplacement, lors de la serpentinisation, d'une paragenèse minérale primaire formée, en plus de l'olivine, d'agrégats de pentlandite+pyrrhotite.

La présence de l'orcellite, le seul arséniure de Ni stable pendant la serpentinisation, reflète des conditions de forte activité de Ni et de faible activité de Fe au sein des fluides impliqués dans la serpentinisation. La fréquence relative de la maucherite souligne l'importance de l'arsenic dans les fluides d'origine mantellique. Les valeurs de l'activité de l'arsenic ont pu être localement aussi élevées que celle du soufre pour former un liquide immiscible riche en As, à l'origine des paragenèses riche en As de haute température.

La combinaison d'études structurale, pétrologique, métallogénique, et géochimique dans des massifs nous a permis de confirmer les conclusions avancées par cet auteur, à savoir : Les ultramafites de Bou Azzer, contenaient des minéralisations magmatiques primaires en Ni-Co, dont les témoins sont encore conservés dans les chromites.

Ces minéralisations auraient ensuite subi deux épisodes de serpentinisation au cours desquelles les minéralisations précoces auraient été remobilisées et re-concentrées (i) un premier épisode océanique syn-rifting et (ii) un deuxième épisode continental contemporain de la compression panafricaine.

La mise en place des intrusions de diorites et de diorites quartziques tardi- à post-panafricaines avaient ensuite déclenché des systèmes hydrothermaux qui auraient concentré et/ou enrichi le stock cobaltifère dans les serpentinites. Il paraît donc que le stock métal des gisements de Cobalt de Bou Azzer est le résultat d'au moins trois stades d'altération post-minéralisation primaire.

La circulation des fluides favorisée par la forte perméabilité des zones d'intense déformation au sein des serpentinites et des zones de contact entre des formations à lithologies contrastées entre la diorite quartzique et les serpentinites. Néanmoins, la distribution des gisements le long de ce contact et la disparité de la paragenèse minérale entre les différents corps minéralisés restent à expliquer : seraient-elles liées à une zonalité métallogénique, elle-même dictée par les conditions physico-chimiques (P-T-fO₂-fS) des fluides ? Ou bien seraient-elles à mettre en relation avec des micro-hétérogénéités locales au sein de l'encaissant mantellique, ou bien en relation avec la tectonique qui aurait créé des zones pièges ou le stock métal se serait déposé ? Le rôle de la serpentinisation dans l'adoucissement du manteau et son exhumation, est un point clé qui sera étudié en détail, tant du point de vue structural que du point de vue géochimique. En particulier, il est important de préciser à quel stade de l'histoire tectonique l'hydratation du manteau a eu lieu et la nature du (des) fluide(s) impliqué(s) (traçage isotopique à l'aide de O, H, Sr, Nd) L'accent sera mis (i) sur la cartographie des zones d'altération à chacune des trois phases d'altération définies ci-dessus et (ii) sur le calcul des bilans de matière associés à chacune des phases d'altération post-minéralisations primaires. Les éventuels enrichissements et/ou lessivages seront ainsi évalués et la part de chaque phase d'altération dans la mise en place du stock métal final quantifié. Il sera donc possible d'établir un modèle génétique pour cette minéralisation presque unique dans le monde.

Les minéralisations associées aux ophiolites de Bou Azzer traduisent des époques métallogéniques superposées et dans lesquelles le phénomène de serpentinisation a joué un rôle important tant sur le plan physique que chimique. Ces minéralisations incluent i) les minéralisations de nickel disséminées dans les termes de la zone de transition de la série ophiolitique ii) les gisements de chromite podiformes et les PGE associés iii) les minéralisations à or et palladium de Bleida Far-West encaissées par des roches basiques des cumulats iv) les minéralisations filoniennes hydrothermales de cobalt, nickel, arsenic et or de Bou Azzer.

En tenant compte des données récentes ([17], [25]) nous considérons que la genèse des minéralisations de Bou Azzer est le résultat de plusieurs processus hydrothermaux et tectono-magmatiques superposés.

Dans le massif d'Ambed où la serpentinisation des roches ultrabasiques n'est que partielle, une paragenèse primaire d'origine magmatique à pentlandite, chromospinelle et magnétite cobaltifère et/ou nickélicifère a été mise en évidence et serait probablement associée aux sulfures de Fe (pyrrhotite et/ou pyrite). En revanche, dans les massifs d'Aghbar et de Bou Azzer Est où la serpentinisation est totale, l'assemblage minéralogique identifié est composé essentiellement de minéraux secondaires de polydymite cobaltifère, millerite cobaltifère, orcélite et magnétite cobaltifère et nickélicifère. Ces phases pourraient provenir du remplacement, lors de la serpentinisation, d'une paragenèse minérale primaire formée, en plus de l'olivine, d'agrégats de pentlandite+pyrrhotite.

La présence de l'orcélite, le seul arséniure de Ni stable pendant la serpentinisation, reflète des conditions de forte activité de Ni et de faible activité de Fe au sein des fluides impliqués dans la serpentinisation. La fréquence relative de la maucherite souligne l'importance de l'arsenic dans les fluides d'origine mantellique. Les valeurs de l'activité de l'arsenic ont pu être localement aussi élevées que celle du soufre pour former un liquide immiscible riche en As, à l'origine des paragenèses riche en As de haute température.

Les déformations panafricaines induisent le fonctionnement des accidents majeurs E-W et ENE qui vont servir de drains aux divers événements hydrothermaux ainsi qu'aux altérations supergènes postérieures. C'est à cette famille qu'appartiennent le filon 7, l'accident majeur ENE de Bou Azzer Est, d'Aghbar et la faille d'Ightem.

Un épisode de redistribution et de reconcentration du nickel et de cobalt sous forme d'arséniures et de sulfures a été décrit par ([17]) mais dont l'âge n'est pas élucidé. L'auteur l'associe à la serpentinisation qui serait aussi responsable de la formation d'une magnétite secondaire enrichie en ces éléments. Il est probable que le gisement à or et palladium de Bleida Farwest récemment découvert soit de type magmatique et associé à cet épisode de rifting.

Après les compressions panafricaines, le domaine de Bou Azzer est soumis à un régime transtensif synchrone du dépôt du Groupe de Ouarzazate ou PIII ([26], [27]) qui conduit à la réactivation des accidents E-W en décrochements sénestres et des accidents NE en failles normales. Un tel contexte extensif a favorisé le développement d'un système de horsts et grabens accompagnés par la remontée de dômes de serpentines, alternant avec des dépressions à dépôts PIII. On peut noter trois dômes principaux, ceux de Bou Offroh, Oumlil et Ait Ahmane. Ce phénomène va se poursuivre postérieurement au dépôt du Groupe de Ouarzazate jusqu'à la base de l'Adoudounien. La montée (doming) des serpentinites forme des dômes ou des lames recoupent les formations de base de la couverture. A la base de celle-ci et en concordance avec les niveaux volcaniques du PIII se développe la carapace d'Ambed qui va jouer le rôle de réceptacle aux minéralisations de type amas (Tamdrost et à Aghbar). Cet épisode est suivi d'une altération des serpentines marquée par une carbonatation intense et une démagnétisation quasi-totale de la surface altérée, allant jouer un rôle important dans la genèse des minéralisations par

l'oxydation et le lessivage du cobalt, nickel, arsenic et soufre décrits ci-dessus (ce procédé naturel est aujourd'hui utilisé dans l'industrie de cobalt).

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, les auteurs remercient Pr. Alansari Abdelkhalek, chef du laboratoire dynamique de la lithosphère et genèse des ressources minérales et énergétiques et Pr. Maacha Lhou, Directeur générale exploration et développement à Managem pour leur soutien scientifique et la direction de CTT mine de Bou Azzer, pour leur soutien logistique et analytique.

RÉFÉRENCES

- [1] Leblanc M., Ophiolites précambriennes et gîtes arsénisés de cobalt (Bou-Azzer, Maroc), *Notes et Mémoire. Service du Géologie, Maroc*, 280, 306 p, 1975.
- [2] Choubert G., L'accident majeur de l'Anti-Atlas. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* 224, 1172-1173, 1947
- [3] Admou.H, Fekkak.A, Rasine.Ph, Egal.E, Youbi.N, Soulaïmani.A, Blein.O, Boudin.T, Chevremont.Ph, *Notes ET mémoires service géologique, Maroc carte géologique Maroc (1/50000) feuille d'Ait Ahmane*, 2011.
- [4] Soulaïmani.A, Admou.H, Fekkak.A, Egal.E, Roger.J, Youbi.N, Rasine.Ph, Blein.O, Boudin.T () : notes et mémoires service géologique, Maroc, carte géologique Maroc (1/50000) feuille Al Gloa, 2011.
- [5] Chevremont Ph., Blein O., Razin Ph., Baudin T., Barbanson L., Gasquet D., Soulaïmani A., Admou H., Youbi N., Bouabdelli M, Anzar-Conseil, *Notice explicative carte géol. Maroc (1/50 000), feuille Bou Azzer, Notes et Mémoires Serv. Géol. Maroc*, 2011.
- [6] Choubert G., Histoire géologique du Précambrien de l'Anti-Atlas: t.1, *Notes et Mémoire. Service de Géologie. Maroc*, 162, 352 p., 1963
- [7] R.S. D'Lemos, J.D. Inglis and S.D. Samson "A newly discovered orogenic event in Morocco: Neoproterozoic ages for supposed Eburnean basement of the Bou Azzer inlier, Anti-Atlas Mountains". *Precambrien Research*. 147, 65-78., 2006.
- [8] H.E. El Hadi, J.F. Simancas, D.Martínez-Poyatos, A.Azor, A.Tahiri, P.Montero, C.M. Bea, F.González-Lodeiro Structural and geochronological constraints on the evolution of the Bou Azzer Neoproterozoic ophiolite (Anti-Atlas, Morocco). *Precambrien. Reserach*. doi:10.1016/j.precamres.2010.06.011, 2010.
- [9] J.L. Bodinier, C. Dupuy and J. Dostal, " Geochemistry of Precambrian ophiolites from Bou Azzer, Morocco", *Contrib. Mineral. Petrol.* 87, pp. 43-50, 1984
- [10] D.D. Naidoo, S.H.Bloomer, A. Saquaque, K. Hefferan, "Geochemistry and significance of metavolcanic rocks from the Bou Azzer-El Graara ophiolite (Morocco)", *Precambrien Research* 53, pp. 79-97, 1991.
- [11] Leblanc M., The Late Proterozoic ophiolites of Bou-Azzer (Morocco): Evidence for panafrican plate tectonic. In: Kröner A. (ed). *Precambrien plate tectonics. Amsterdam, Elsevier Sci. Publ.*, 435-451, 1981.
- [12] J. D. Inglis., R.S. D'Lemos, S.D. Samson and H. Admou, "Geochronological constraints on Late Precambrian intrusion, metamorphism, and tectonism in the Anti-Atlas Mountains", *J. Geol.* 113, 439-450, 2005.
- [13] Wafik. A : Etude géochimique et métallogénique d'un système hydrothermal océanique fossile : Exemple des minéralisations cuprifères dans les ophiolites protérozoïques de l'Anti-Atlas central (Maroc), Thèse d'Etat es-Sciences, Université Cadi Ayyad, Faculté des sciences-Marrakech, 241p, 2001.
- [14] Wafik A., Admou H., Bhilisse M., Constantin M., Maacha L., En-Naciri A., Hajjar Z., Etude préliminaire sur le rôle de la serpentinisation dans la genèse des minéralisations arsénisées de Co-Ni et métaux précieux dans l'ophiollite néoprotérozoïque de Bou Azzer, Anti Atlas Central Maroc. Colloque International Terre & Eau 2012. Annaba, Algérie 20-22 novembre 2012. p 65, 2012.
- [15] Zouita .F : Etude de la distribution des terres rares et autres éléments en traces dans les roches carbonatées du district minier de Bou Azzer-Bleida (Anti Atlas, Maroc) ; conséquences génétiques et variatios à l'approche des minéralisations. Thèse Doctorat, Université Cadi Ayyad, Faculté des sciences-Marrakech, 170p, 1986.
- [16] Bhilisse, M., Wafik, A., Admou, H., Maacha, L., and Constantin. M, Les dépôts magnésiens et leur relation avec la serpentinisation à l'Est de Bou Azzer, (Boutonnière de Bou Azzer -El graara, Anti Atlas Central). *8^{ème} Colloque international 3MA*, du 8 au 12 Mai 2013, Marrakech, Maroc, 2013.
- [17] Alansari, A. Rapport Ni Aghbar de Bou Azzer Est. *Rapport inédit.CTT*, Mine de Bou Azzer, 80 pp., 2010.
- [18] A.Wafik, A. Saquaque, A. El Boukhari, " les chromitites podiformes et les minéraux de Fe-Cu-Ni-Co associés à l'ophiollite de bou azzer-el graara (Anti-Atlas central, Maroc)", *ofioliti*, 2001, 26 (2b), 467-478, 2001.
- [19] El Ghorfi, M : Etude géochimique et métallogénique des métaux précieux (or, argent et platinoïdes) associés aux minéralisations à Co, Ni, Cr de Bou Azzer-El Graara, et dans la série de Bleida Far West, Anti Atlas, Maroc: Unpublished PhD thesis, Marrakech, Morocco, Université Cadi Ayyad, 256 p, 2006.

- [20] EL Ghorfi M., Wafik, A. and R'kha, K., Les éléments du groupe du platine dans l'ophiolite de Bou Azzer-El Grrara (Anti-Atlas Central) Maroc. 5^{ème} colloque International 3MA, Fès 10-12 Mai 2007, pp. 93, 2007.
- [21] Jouravsky, Cobalt et Nickel. 19^{ème} Cong. Géol. Inter., Alger, Monogr. Régi. , Maroc1, 87-101, 1952.
- [22] Wafik A., Saquaque A., Admou H., Compounds of Cu-Ni-Fe in chromitites of the proterozoic ophiolites of Bou Azzer (Anti Atlas central, Morocco). Abs. IESCA- 2000, 25-29 Septembre. DEU-Izmir (Turquie), p146, 2000.
- [23] Maacha L., EL Ghorfi M., En-naciri A., Alansari A., Saquaque A. and Soulaïmani A., *Les gisements de chromite et platinoïdes associés aux ophiolites de Bou Azzer (Anti-Atlas central)*. Notes et mémoires du service géologique, N° 564, V. 9 : Nouveaux Guides Géologiques et Miniers du Maroc/ Les Principales Mines du Maroc. Éds. Du Service géologique du Maroc. Pp 99-104, 2012.
- [24] A. En-Naciri, L. Barbanson and J.C. Touray, "Mineralized hydrothermal solution cavities in the Co-As Ait Ahmane mine (Bou Azzer, Morocco)", *Minéral. Deposita* 30, 75-77, 1995.
- [25] Machaa.L: Etude métallogéniques ET géophysiques des minéralisations cobaltifères et cuprifères de Bou-Azzer ElGraara Anti Atlas Maroc (Tome 1) Thèse d'Etat es-Sciences, Université Cadi Ayyad, Faculté des sciences-Marrakech, 344p, 2013.
- [26] Azizi samir M.R, Géologie du précambrien III et traitement statistique des données géochimiques de prospection dans la boutonnière de Bou Azzer-ElGraara (Anti Atlas, Maroc) thèse univ.grenoble 1.25 Op, 1990.
- [27] Soulaïmani A., Piqué A. & Bouabdelli M., La série du PII-III de l'Anti-Atlas occidental (Sud Marocain) un olistostrome à la base de la couverture post-panafricaine (PIII) du Protérozoïque supérieur. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, 332 : 121-127, 2003.