

Application des méthodes d'analyses statistiques multivariées à l'étude de l'altération supergène dans le gisement aurifère d'lourirne (Boutonnière de Tagragra d'Akka, Anti-Atlas occidental, Maroc)

[Application of multivariate statistical analysis methods to the study of supergene alteration in the gold deposit of lourirne (Tagragra of Akka inlier, western Anti-Atlas, Morocco)]

Mohamed BENBRAHIM^{1,2}, Mohamed AISSA², Moulay Lahsen MAHDOUDI², and Mohamed ZOUHAIR³

¹Regional Centre for the Education and Training, Inezgane, Morocco

²Department of geology, Laboratory of studies of mineral and energy, University Moulay Ismail, Faculty of science, Meknes, Morocco

³Group MANAGEM, Casablanca, Morocco

Copyright © 2017 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: lourirne gold deposit is located in Tagragra of Akka inlier, 260 km to the southeast of Agadir, (Western Anti-Atlas). The gold mineralization occurs in quartz veins associated with shear zones occurring in East-West direction and cut across the Early forming process of Neoproterozoic formations. This study aims to characterize supergene alteration characterization of lourirne gold mineralization, by macroscopic, microscopic observations, chemical analysis of major elements, analysis of the correlation matrix and analysis in Principal Components (PCA).

The main results are as follows:

- The mobility of a number of chemical elements such as Ti, Fe, P, Ca, Mg, Mn.
- The development of Hematitization phenomenon of supergene origin.
- The abundance of metallic minerals such as magnetite, hematite, covellite, malachite, azurite and sphalerite...
- The oxidation of sulphides including arsenopyrite, pyrite, chalcopyrite...

KEYWORDS: Supergene alteration, Gold bearing quartz, lourirne, Anti-Atlas.

RESUME: Le gisement aurifère d'lourirne est situé à 260 km au Sud-Est d'Agadir, dans la boutonnière du Tagragra d'Akka (Anti-Atlas occidental). La minéralisation aurifère se présente dans des filons quartzeux à texture bréchique, associés à des zones de cisaillement de direction E-W et recoupant les formations du protérozoïque inférieur. Cette étude a pour but la caractérisation de l'altération supergène des filons aurifères d'lourirne, par les observations macroscopiques, microscopiques, les analyses chimiques des éléments majeurs, l'analyse de la matrice de corrélation et l'analyse en Composantes Principales (ACP). Les principaux résultats sont les suivants :

- La mobilité d'un certain nombre d'élément chimique tels que Ti, Fe, P, Ca, Mg, Mn.
- Le développement de phénomène d'hématitisation d'origine supergène.
- L'abondance des minéraux métalliques tel que la magnétite, l'hématite, la covellite, la malachite, l'azurite, la sphalérite...
- L'oxydation importante des sulfures notamment l'arsénopyrite, la pyrite, la chalcopyrite...

MOTS-CLEFS: Altération supergène, Quartz aurifère, lourirne, Anti-Atlas.

1 INTRODUCTION

La mine d'Iourirne est située dans l'Anti-Atlas occidental à 260 Km au Sud-Est d'Agadir (Figure 1a). L'activité minière à Iourirne remonte à la période du règne des Almohades (Ere de l'or au Maroc entre XIIe XIIIe siècle) comme en témoignent de nombreux grattages qui peuvent aller jusqu'à 12 m de profondeur. La minéralisation aurifère est signalée pour la première fois dans la boutonnière de Tagragra d'Akka par Thiebault L. en 1939 [1], suite à une campagne d'exploration de l'or dans l'Anti-Atlas. Depuis cette période, plusieurs travaux de recherches ont été réalisés principalement par le Bureau de Recherches et de Participation Minière (B.R.P.M) dans la boutonnière de Tagragra d'Akka, par la suite MANAGEM filiale du groupe Omnium Nord Africain (ONA) a pris le relè ce qui aboutit à la création de la société Akka Gold Mining (AGM) en 1995. Ces différents travaux ont permis d'estimer les réserves à environ 1 Mt de minerai de l'ordre de 10g/t Au [2]. Cette étude a pour objectif d'étudier les effets de l'altération supergène sur les filons de quartz aurifère en utilisant les méthodes d'analyses statistiques multivariées la question qui s'oppose est la suivante :

- Qu'il est l'origine du phénomène d'Hématitisation observé au niveau des filons aurifères d'Iourirne ?

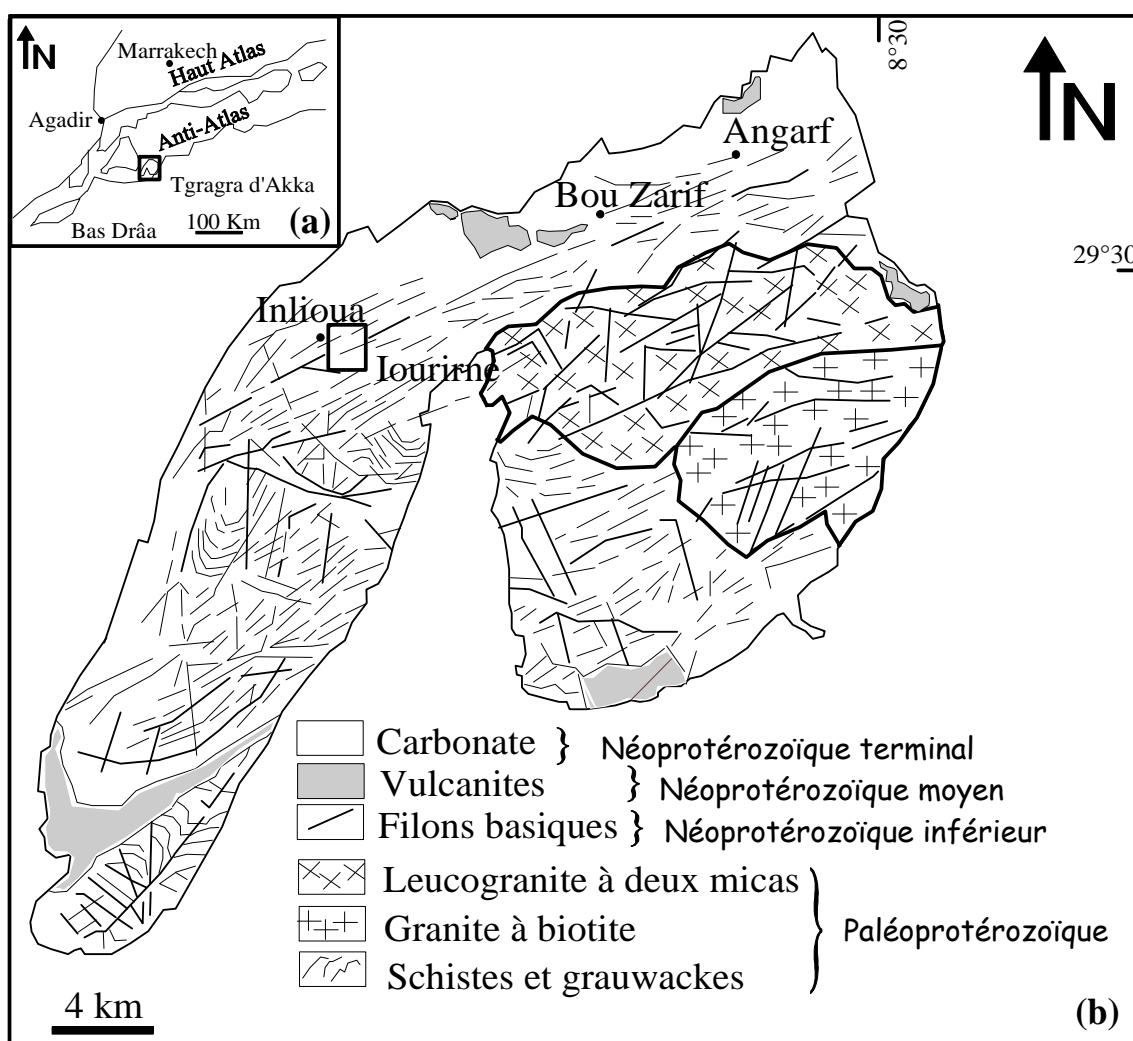


Fig. 1. : Carte géologique simplifiée montrant (a)- Situation de la boutonnière de Tagragra d'Akka et (b)- Carte géologique de Tagragra d'Akka et situation de gisement aurifère d'Iourirne, [3], [4] et [5].

2 METHODOLOGIE

Pour répondre à la question précédente et à l'objectif de cette étude, diverses méthodes sont utilisées :

- Un échantillonnage est réalisé dans les filons aurifères (B, C, D', F) à différents niveaux pour faire une étude macroscopique et microscopique (lames minces et polies).
- Les types d'analyses utilisés sont l'analyse en roche totale (I.C.P), les analyses ponctuelles au microscope électronique à balayage (M.E.B), effectuées au laboratoire de Réminex, Mine de Guemassa, groupe Managem / ONA et des analyses de microsonde électronique effectuées dans les laboratoires des universités Paris-6 et Orléans en France.

3 CADRE GEOLOGIQUE REGIONAL ET LOCAL

3.1 CONTEXTE GÉOLOGIQUE GÉNÉRAL

La boutonnière de Tagragra d'Akka est formée de deux lobes, l'un oriental et l'autre occidental, composés de formations paléoprotérozoïques et séparées par un rentrant N-S de nature carbonaté et d'âge néoprotérozoïque terminal. Il correspond aux formations de la couverture qui surplombent, la boutonnière de Tagragra d'Akka (Figure 1b).

3.1.1 LOBE ORIENTAL

Il est caractérisé par l'abondance des massifs granitiques : leucogranite à deux micas et granite à biotite [3], [4], d'âge éburnéen. Ces massifs granitiques sont intrusifs dans des formations métamorphiques et volcano-sédimentaires qui sont d'âge plus ancien paléoprotérozoïques. L'ensemble de ces formations est traversé par des filons de dykes basiques (Figure 1b).

3.1.2 LOBE OCCIDENTAL

Il est principalement formé de roches métamorphiques et volcano-sédimentaires d'âge paléoprotérozoïques, traversées par des dykes de roches magmatiques connues sous le nom de « dykes basiques ». Le secteur d'Iourirne, domaine de cette étude, appartient à ce lobe occidental (Figure 1b).

3.2 CONTEXTES GÉOLOGIQUES DU DISTRICT D'IOURIRNE

Le secteur d'Iourirne a fait l'objet d'une cartographie au 1/25 000 dans sa partie centrale (Figure 2) et une étude détaillée des formations qui composent sa partie septentrionale. Les différentes formations observées sont :

- les formations sédimentaires du protérozoïque inférieur (PI) : elles sont constituées par des alternances de pélites, pélites graphiteuses et de grés-pélites. L'ensemble est métamorphisé dans le faciès schiste vert et affecté par une schistosité principale S1 associée aux phases de déformation éburnéenne. Celle-ci est généralement subparallèle à la stratification S0. Elle est caractérisée par une direction N30 à N75 et un pendage de 60°NNW. Une deuxième schistosité S2, a été mise en évidence, d'orientation générale N05 à N35 avec un pendage de 55°WNW, elle est attribuée aux premières phases de déformation panafricaine [6], [7].
- les formations magmatiques : elles se présentent sous forme de dykes de nature basique (gabbro) ou acides (rhyo-dacite porphyrique, granodiorite, diorite et diorite quartzique). Les dykes magmatiques recoupent les formations sédimentaires précédentes. Ils sont orientés selon deux directions apparentes NNE-SSW et EW.
- Les filons aurifères d'Iourirne se présentent sous forme de filon de direction EW. Elles sont à texture bréchique et recoupent les formations métamorphiques et magmatiques encaissantes en développant un jeu décrochant dextre (Figure 2).

4 ETUDE MACROSCOPIQUE ET MICROSCOPIQUE

Les observations macroscopique et microscopique des échantillons à quartz aurifère a permis d'individualiser une zone d'altération supergène qui s'étale verticalement depuis la surface jusqu'à -125 m environ, les échantillons qui appartiennent à ce domaine d'altération supergène sont caractérisés par une teinte rougeâtre, (photo 1), Les principales phases métalliques observées dans cette zone sont :

- **Hématite** : L'étude des lames minces polies confectionnées dans les échantillons récoltés à différents niveaux du profil (0 - 125 m) montre que ce minéral est caractérisé en lumière polarisée par une anisotropie nette dans des teintes gris verdâtres à brunâtres claires. L'hématite est très abondante, elle existe sous divers habitus, en baguettes dispersées ou en petites plages xénomorphes, provenant de l'oxydation de la magnétite (photo 2), c'est le phénomène d'Hématitisation.

- **Magnétite** : Oxyde faisant partie des spinelles. L'observation microscopique montre que la magnétite est caractérisée par une couleur grise bleuté à grise brunâtre. Au contact de l'hématite, elle est d'un brun plus sombre que celui de l'hématite. La magnétite est transformée presque totalement en hématite durant l'altération supergène avec quelques minéraux de tourmaline en inclusions. Une observation de détail, montre des reliques de pyrite et d'arsénopyrite (photos 3 et 4) dans la magnétite ce qui suggère qu'une partie au moins de ce minéral s'est formé au détriment de certains sulfures par oxydation.

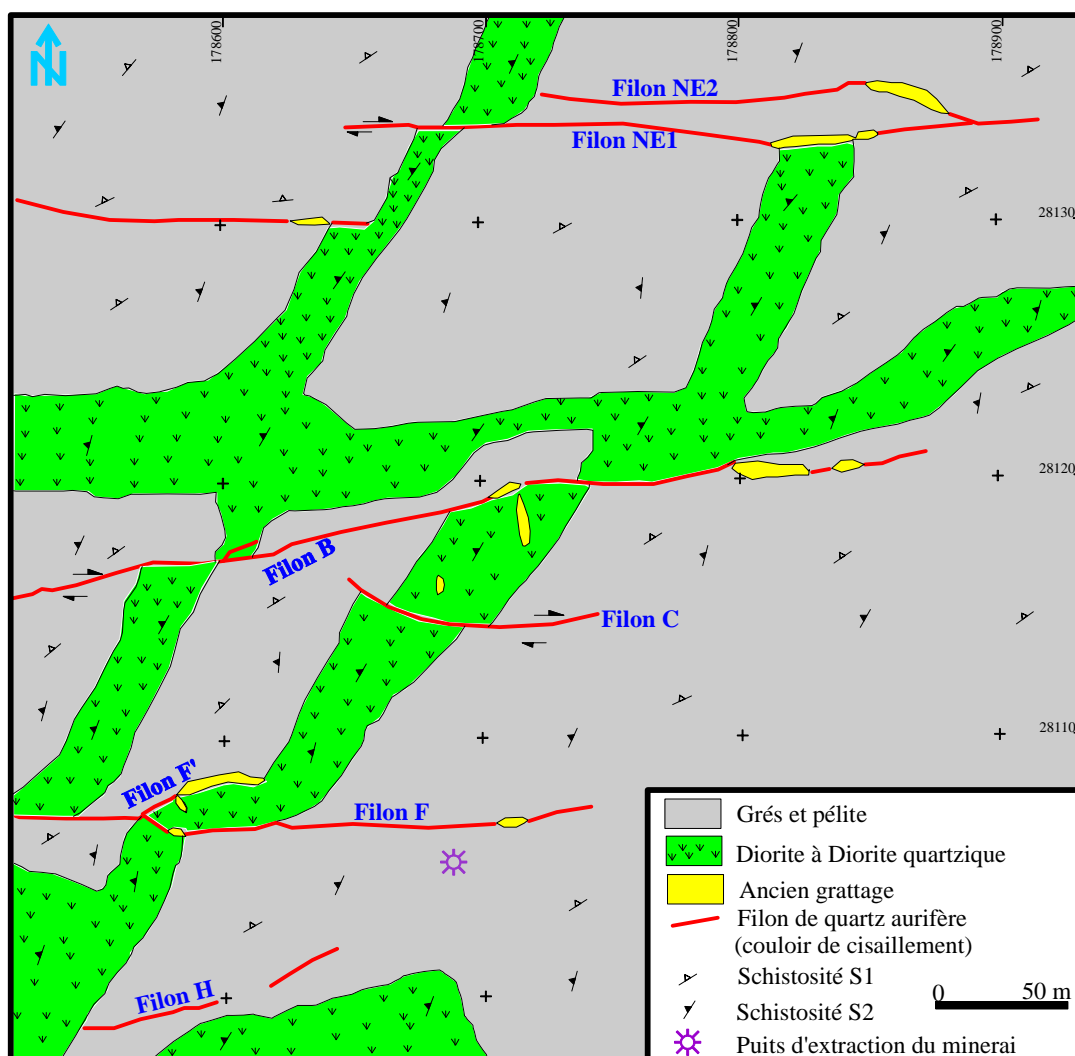


Fig. 2. : Carte géologique d'Iourine [8]

- **Pyrite** : se présente en cristaux automorphes et en plages sub-automorphes, elle est globalement associée à plusieurs phases sulfurées telles que l'arsénopyrite et la pyrrhotite.
- **Malachite** : provient de l'oxydation de la chalcopryrite (photo 5).
- **Azurite** : de couleur bleue, elle provient également de la transformation de la chalcopryrite, (photo 6).
- **Arsénopyrite** : il est relativement rare par rapport à la pyrite, la magnétite, l'hématite, contrairement à ce qui ressort dans les niveaux profonds où l'arsénopyrite est dominante. Ce minéral se présente sous forme massive très souvent cataclasé.
- **Chalcopryrite** : abondante dans les niveaux étudiés, elle est souvent transformée partiellement en malachite et azurite. La chalcopryrite est généralement bordée par la covellite. Ce dernier minéral remplace parfois la quasi-totalité du cristal de la chalcopryrite (photo 7). L'oxydation de la chalcopryrite montre le développement d'une pellicule à covellite qui est en contact directement avec une zone à hématite (photo 7), qui peut également se développer sur la chalcopryrite en y conservant

quelques reliques témoignant de cette transformation par oxydation (photo 8). Ce type de transformation confirme qu'un aspect de la minéralisation d'Iourine est lié à l'altération supergène.

- **Covellite** : C'est un sulfure de cuivre caractéristique des zones d'oxydation. Elle se présente sous forme de croûte externe tapissant les bordures de la chalcopirite et formant des auréoles autour de ses minéraux. Ces auréoles peuvent évoluer en veinules recoupant les différents minéraux de la matrice. La covellite ainsi formée peut se déposer dans des fissures et géodes en masses collomorphes ou fibreuses (photos 7 et 8). Elle est présente dans tous les échantillons du profil étudié (0 -125 m) en association avec la chalcopirite et l'hématite.

- **Sphalérite** : elle est de couleur grise avec une légère teinte brune claire et montre des réflexions internes rougeâtres très caractéristiques de ce minéral (photo 9).

- **Or** : Dans la zone d'altération supergène, l'or est présent en inclusions dans la magnétite, la chalcopirite avec des hydroxydes de fer (photos 10 et 11) et rarement dans l'arsénopyrite. Il a souvent une couleur jaune rougeâtre en liaison vraisemblablement avec la présence d'oxyde de fer.

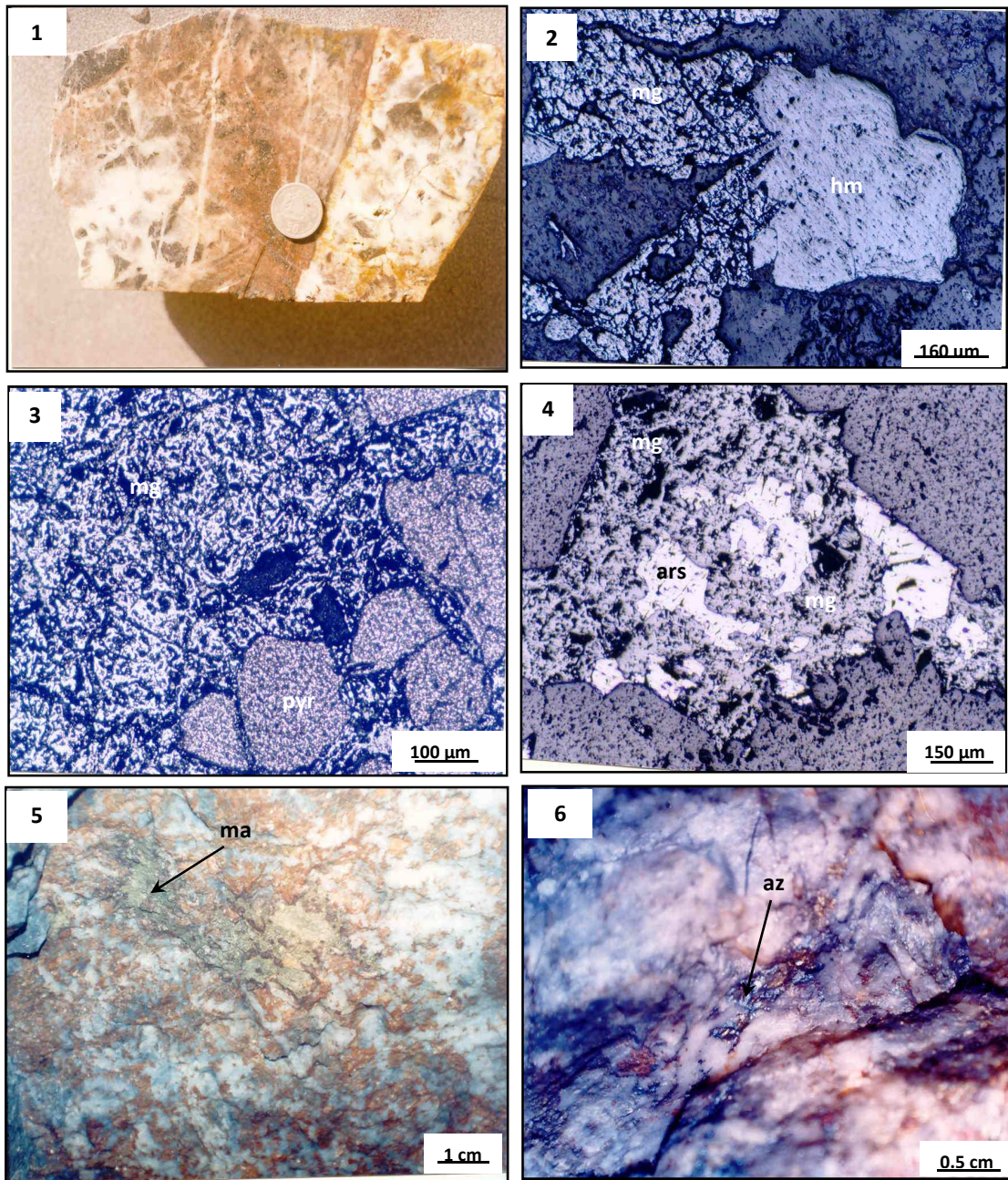


Photo 1 : Développement des oxydes et hydroxydes de fer, dans un échantillon de surface du filon à quartz aurifère d'Iourirne, traduisant l'effet de l'altération supergène, (œil nu).

Photo 2 : Observation au microscope métallographique de l'oxydation de la magnétite (mg) en hématite (hm).

Photo 3 : Observation au microscope métallographique des reliques de pyrite (pyr) au sein de la magnétite (mg).

Photo 4 : Observation au microscope métallographique des reliques d'arsénopyrite (ars) dans la magnétite (mg).

Photo 5 et 6 : Développement de la malachite (ma) et de l'azurite (az) dans le quartz aurifère d'Iourirne, (œil nu).

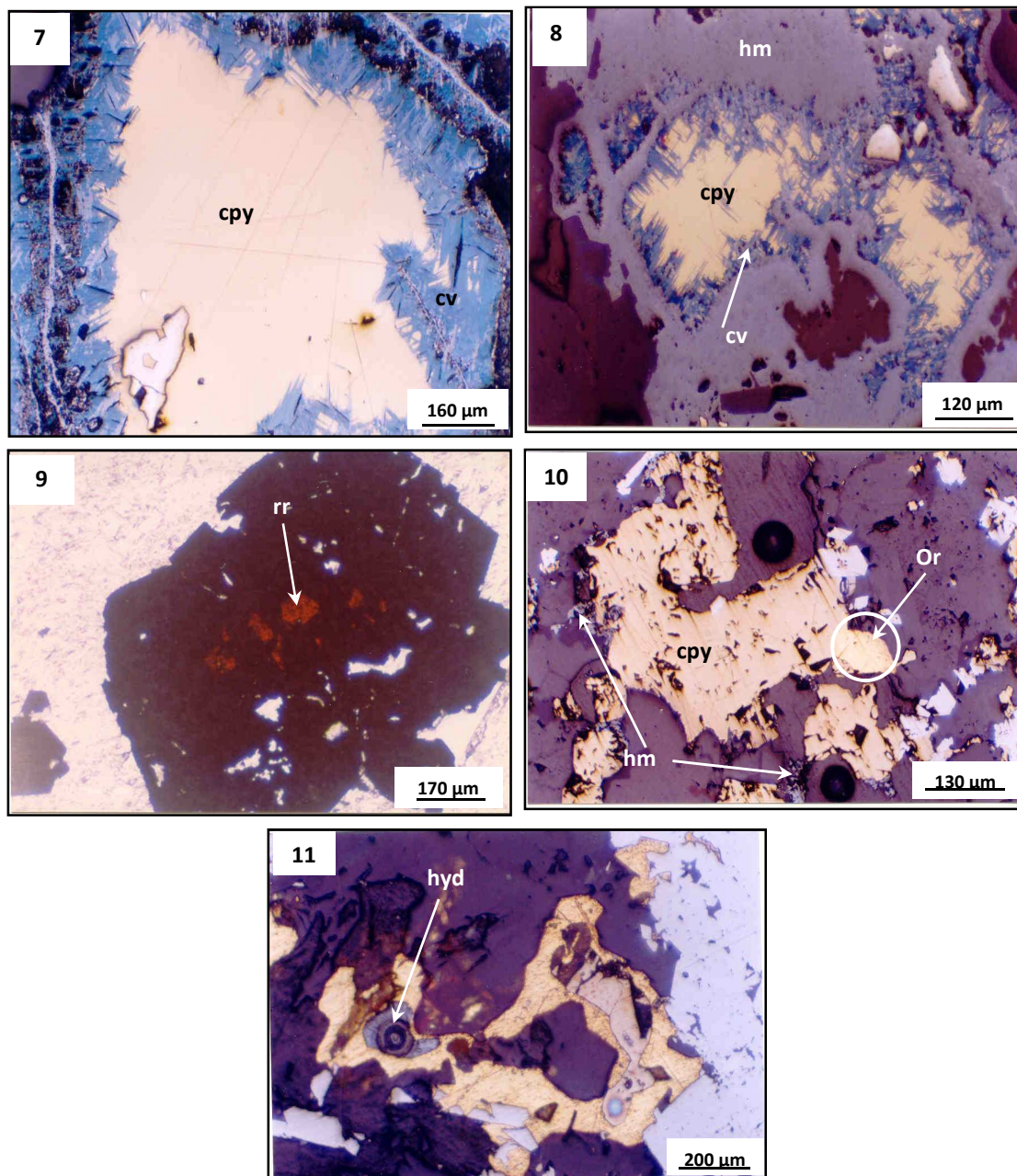


Photo 7 : Développement d'une auréole de covellite (cv) autour de la chalcopirite (cpy), au microscope métallographique.

Photo 8 : Oxydation de la chalcopirite en covellite (cv) et hématite (hm), au microscope métallographique.

Photo 9 : réflexion interne rougeâtre (rr) de la sphalérite au microscope métallographique.

Photo 10 : minéral d'or en association avec la chalcopirite (cpy), avec développement des minéraux d'hématite (hm), au microscope métallographique.

Photo 11 : pépite d'or avec des hydroxydes de fer (hyd), au microscope métallographique.

5 DONNEES ANALYTIQUE ET DISCUSSION

L'objectif principal de cette étude est d'utiliser les analyses géochimiques (Analyse en roche totale) des échantillons des filons aurifères (B, C, D' et F) récoltés à différents niveaux pour réaliser l'approche statistique multivariée et donner une vision globale sur les comportements géochimiques des échantillons de surface qui appartient au profil (0 - 125m) par rapport à ceux de profondeur (Au-dessous de -125m), la décomposition en vecteurs propres indique que 82,464 % (échantillons de surface) et 86,709 % (échantillons de profondeur) de l'information du système est contenue dans les deux premiers axes statistiques (Tableaux 1 et 2), alors on ne retient donc que les deux premières dimensions pour interpréter l'analyse.

Tableau 1. Le pourcentage d'inertie expliquée par les différentes composantes de l'ACP, pour les échantillons de surface.

Composante	Valeurs propres initiales			Sommes de rotation du carré des chargements		
	Total	% de la variance	% cumulé	Total	% de la variance	% cumulé
1	6,631	66,315	66,315	4,190	41,896	41,896
2	1,615	16,149	82,464	4,057	40,568	82,464
3	1,088	10,876	93,340			
4	0,513	5,126	98,466			
5	0,055	0,547	99,013			
6	0,047	0,467	99,480			
7	0,033	0,330	99,810			
8	0,011	0,107	99,918			
9	0,005	0,049	99,967			
10	0,003	0,033	100,000			

Tableau 2. Le pourcentage d'inertie expliquée par les différentes composantes de l'ACP, pour les échantillons de profondeur

Composante	Valeurs propres initiales			Sommes de rotation du carré des chargements		
	Total	% de la variance	% cumulé	Total	% de la variance	% cumulé
1	7,661	76,612	76,612	5,554	55,539	55,539
2	1,010	10,096	86,709	3,117	31,169	86,709
3	0,737	7,370	94,079			
4	0,414	4,143	98,222			
5	0,115	1,151	99,373			
6	0,044	0,439	99,812			
7	0,012	0,125	99,936			
8	0,003	0,031	99,968			
9	0,002	0,019	99,987			
10	0,001	0,013	100,000			

La projection des variables des échantillons de surface et profondeur sur le plan factoriel 1-2 (Figures 3 et 4), montrent que :

- Les éléments chimiques SiO₂, CaO, MgO, MnO sont moins mobile (Figures 3 et 4), SiO₂ présente des corrélations négatives avec MgO (-0,94), CaO (-0,90), MnO (-0,88) (Tableau 3), ceci se traduit sur le plan minéralogique par le départ de la silice et la néoformation des carbonates type ankérite (Figure 5), par le phénomène hydrothermale.

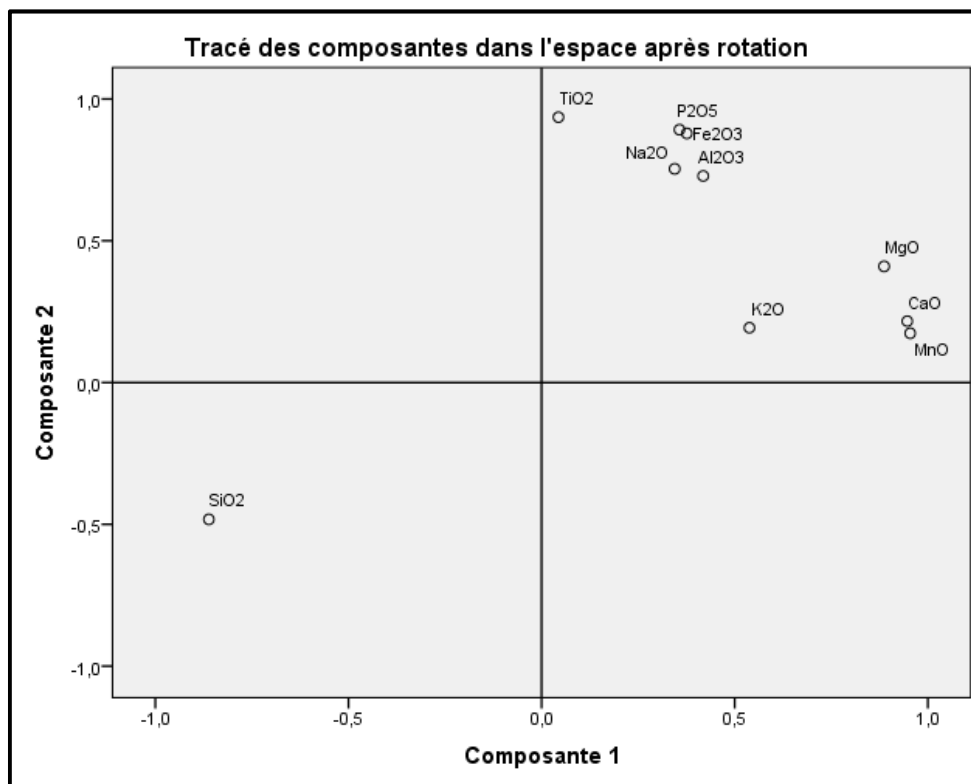


Fig.3. : Projection des analyses chimiques des échantillons de surface sur le plan factoriel 1-2

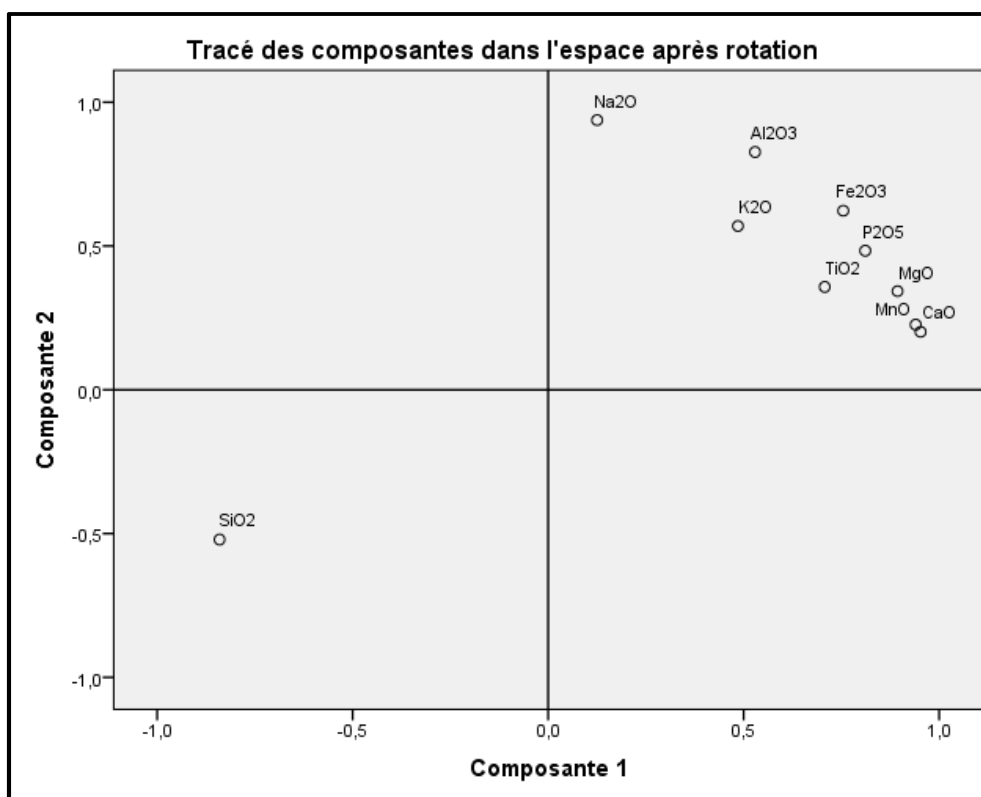


Fig. 4. : Projection des analyses chimiques des échantillons de profondeur sur le plan factoriel 1-2

Tableau 3. Le tableau de corrélation entre les éléments chimiques majeurs de filon à quartz aurifère de surface à Iourirne.

	SiO ₂	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅
SiO ₂	1	-0,68	-0,75	-0,73	-0,90	-0,94	-0,59	-0,88	-0,47	-0,71
Na ₂ O		1	0,75	0,77	0,47	0,62	0,24	0,40	0,54	0,69
Al ₂ O ₃			1	0,67	0,44	0,59	0,72	0,40	0,63	0,67
Fe ₂ O ₃				1	0,59	0,72	0,20	0,55	0,83	0,95
CaO					1	0,95	0,37	0,98	0,26	0,56
MgO						1	0,42	0,94	0,42	0,70
K ₂ O							1	0,40	0,21	0,26
MnO								1	0,25	0,55
TiO ₂									1	0,91
P ₂ O ₅										1

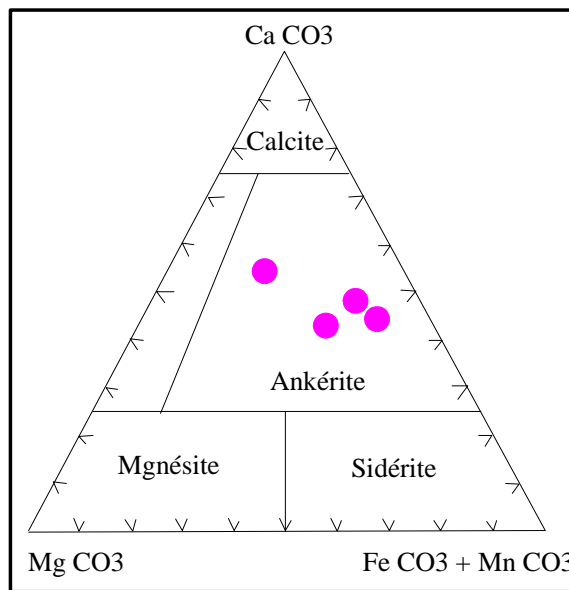
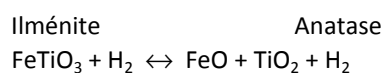


Fig. 5. : La composition chimique des carbonates de filon à quartz aurifère d'Iourirne [8].

- L'élément chimique Fe₂O₃ présente une mobilité (Figures 3 et 4), qui pourrait être expliqué par la libération de fer à partir de la chlorite et l'oxydation des sulfures (arsénopyrite, pyrite, chalcopyrite, magnétite...). Ce phénomène est le même que celui décrit par Bonnemaïson [9], dans les filons aurifères du Burkina-Faso, il porte le nom de bouffées rouges ou hématitisation. En note l'abondance des veinules d'oxydes de fer au niveau des espaces intergranulaires de quartz microcristallin ce qui entraîne l'augmentation de la porosité et favorise la perte de cohésion au niveau de ce type de quartz [10], ce phénomène d'hématitisation est considéré d'origine hydrothermale par Zouhair, [7], mais nos observations pétrographiques et géochimiques montrent que l'expression minéralogique de l'hématite se limite au domaine d'altération supergène.

- Mobilité des éléments chimiques TiO₂ et P₂O₅ (Figures 3 et 4) qui va de pair avec une corrélation importante avec Fe₂O₃ (0,83 et 0,95) (Tableau 3), cette richesse est due principalement à la précipitation massive des oxydes ferrotitanés en particulier l'ilménite, cette dernière a subi une déstabilisation importante qui finit par se transformer en anatase selon la réaction suivante.



L'analyse au MEB montre que l'ilménite a la composition chimique suivante, (O = 24,57 %poids, Ti = 35,69 %poids, Fe = 39,74 % poids) (Figure 6).

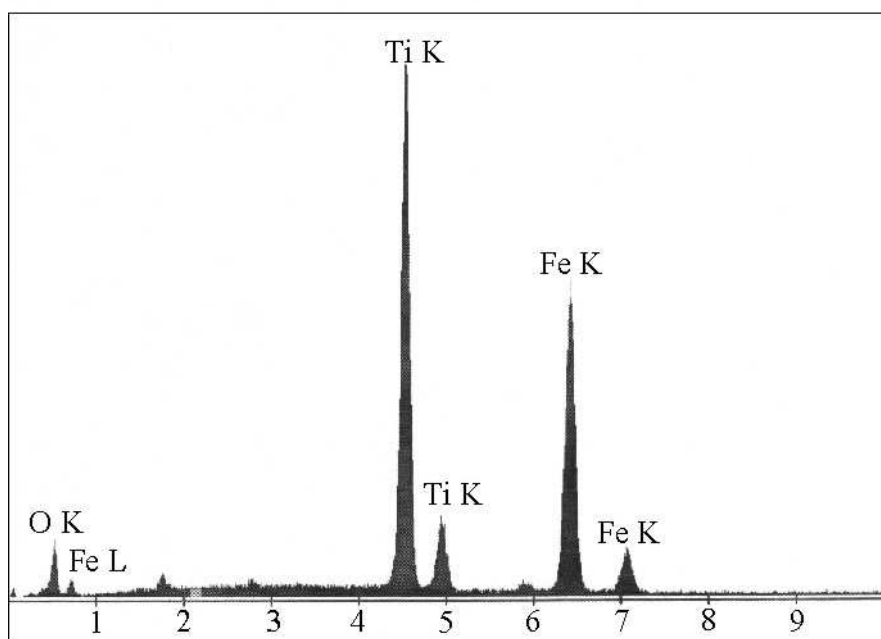


Fig.6. : Le spectre semi-quantitatif de l'ilménite obtenue par analyse au microscope électronique à balayage.

6 CONCLUSION

L'étude macroscopique, microscopique, géochimique et l'application des méthodes d'analyses statistiques multivariées pour l'étude de l'altération supergène de filon à quartz aurifère d'Iourine a permis d'en tirer ces principales conclusions :

- Lorsque l'altération supergène est très intense, le quartz lié généralement à la minéralisation aurifère, présente une grande porosité, il est constitué essentiellement de fissures résultant de la dissolution des carbonates et les vides laissés par les sulfures après oxydation, donc le quartz perd sa cohésion ce qui favorise la circulation des fluides supergène avec accumulation d'oxydes de fer dans les espaces intergranulaires de quartz et les pores de la roche.
- L'altération supergène a une influence sur la mobilité d'un certain nombre d'éléments chimiques tels que TiO_2 , P_2O_5 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , MnO .
- L'ankérite qui est en cristaux automorphe à sub-automorphe, elle est partiellement ou entièrement transformée en hydroxydes de fer.
- Le phénomène d'hématitisation est contrôlé par l'effet de l'altération supergène.
- Les minéraux métalliques qui caractérisent cette phase supergène sont la pyrite, la chalcopryrite, la covellite, la magnétite, l'hématite et la blende.

REMERCIEMENTS

Mes remerciements s'adressent à Monsieur Mohamed Zouhair, pour son accueil très chaleureux lors de mes missions de terrains, sa sympathie et ses encouragements permanents et les moyens qu'il a mis à ma disposition pour mener bien à mes travaux de terrain. J'exprime aussi ma reconnaissance à Monsieur Atman Madi, ex chef du service de géologie et tous les cadres et le personnel de la mine, je citerai Abdelmalek Ouadjou, Mohamed Outhounjit, Benyass Maamar, Laabarta Khalid, Lahssen Rakhiss...

REFERENCES

- [1] Thiébaud, L., Choubert J., Matveieff D., et Rampont P., Rapport sur les opérations de prospection d'or dans l'anti-atlas. Arch. Serv. Mines. Maroc, 1939.
- [2] Barodi B., Annich M., AitKassi A., Zouhair M., La recherche de l'or au Maroc, cas du gîte d'lourirne et revue des indices d'or. Chronique de la recherche minière, n° 531-532, pp 93-107, 1998.
- [3] Choubert, G., Histoire géologique du précambrien de l'Anti-Atlas. Note et Mém. Serv. Géol. Maroc, n° 162, 352p, 1963.
- [4] Mortaji, A, La boutonnière précambrienne de la Tagragra d'Akka (Anti-Atlas occidental ; Maroc) : Pétrologie et géochimie des granitoïdes, filons basiques et métamorphismes associées, Thèse 3^{ième} cycle Univ. Nancy I. France, 211pp, 1989.
- [5] Gasquet, D. ; Roger, F. ; Chlot-Prat, F. ; Hassenforder B. ; Baudin, T. ; Chevremont, P. ; Benlakhdim, A. ; Mortaji, A. ; Benssaou, M., Carte géologique du maroc au 1/50 000 feuille de Tamazrara. Note et mémoire du service géologique N°415 bis. P.95, 2001.
- [6] Marignac C., Contribution à l'étude du potentiel aurifère des Tagragra d'Akka et de Tata. Rapport inédit BRPM, Rabat, Maroc. 17p, 1990.
- [7] Zouhair, M., Les paléocirculations fluides dans la Tagragra d'Akka (Anti-Atlas ; Maroc). Etude combinée des inclusions fluides et de la déformation du quartz aurifère conséquences pour la métallogénie de l'or. Thèse Université I.N.P.L Lorraine, France, 393 pp, 1992.
- [8] Benbrahim, M., Gisement aurifère d'lourirne (Tagragra d'Akka, Anti-Atlas occidental, Maroc) : Caractérisation pétrographique, géochimique et paléocirculations fluides. Thèse Univ. Moulay Ismaïl, Meknès, Maroc, p.239, 2005.
- [9] Bonnemaïson, M, Premiers résultats de l'étude du quartz aurifère d'Afrique de l'Ouest, Rapport BRGM 83 SGN 160 GMX, 1983.
- [10] Bonnemaïson, M, Les filons de quartz aurifère : un cas particulier de shear-zone aurifère. Chron. Rech. Min N°482 pp 55-66, 1986.