

## Caractérisation géostatistique et minéralogique des métaux précieux (Au, Ag) en rapport avec les métaux de base (Zn, Pb, Cu, As) dans le gisement polymétallique d'Amensif (Haut-Atlas occidental, Maroc)

*Geostatistical and mineralogical characterization of precious metals (Au, Ag) in relation to base metals (Zn, Pb, Cu, As) in the polymetallic deposit of Amensif (western High Atlas, Morocco)*

Fatimazahra OUMASSE<sup>1\*</sup>, Lakhlifi BADRA<sup>1</sup>, Abdelkader EL MAZ<sup>1</sup>, Joelle RISS<sup>2</sup>, Alexandre LIMA<sup>3</sup>, Lhou MAACHA<sup>4</sup>, Aomar ENNACIRI<sup>4</sup> & Mohamed OUTHOUNJITE<sup>4</sup>.

1. Université Moulay Ismaïl, Faculté des Sciences, Département de Géologie, B.P. 11201 Zitoune, 50000 Meknès, Maroc \*(fatima.zoumasse@gmail.com).
2. Université de Bordeaux, I2M UMR5295, Bâtiment A11-351, Cours de la Libération, 33405 Talence Cedex, France.
3. Universidade do Porto, Faculdade de ciencias, Departamento Geociencias, Ambiente e Ordenamento do Território, Rua do Campo Alegre, s/n, 4169-007 Porto, Portugal.
4. Groupe MANAGEM, Twin center, Tour A, BP 5199, Casablanca, Maroc.

**Résumé.** La minéralisation polymétallique (Zn, Cu, Pb, As, Ag, Au) du gisement filonien d'Amensif (Haut-Atlas occidental) est encaissée dans des formations schisto-carbonatées et volcano-sédimentaires, attribuées au Cambrien inférieur. La présence des skarns (dans le Nord de la zone d'étude) et du bismuth natif, attesterait de l'existence d'une activité hydrothermale liée à une intrusion magmatique acide enfouie. Trois stades hydrothermaux de mise en place de la minéralisation y ont été distingués. La concentration de l'or est rapportée au premier stade, caractérisé principalement par le dépôt de la pyrite et de l'arsénopyrite dans une gangue de quartz. L'argent est attribué au stade à métaux de base (Zn, Pb, Cu), caractérisé par le dépôt de la chalcopryrite, la sphalérite, la galène et les sulfosels d'argent dans une gangue dolomitique.

L'analyse statistique portant sur les variables Pb, Zn, Cu, As, Fe, Ag et Au de 505 échantillons de carottes montre les corrélations suivantes : Ag lié principalement à Cu, Au à As, Fe au couple (Au-As), et Pb, Zn au couple (Cu-Ag).

Les cartes de krigeage montrent que les plus fortes teneurs en Au et Ag apparaissent cantonnées essentiellement dans les parties septentrionale et centrale de la zone d'étude. La distribution de l'argent se projette dans la continuité du filon principal de direction N15°E, tandis que celle de l'or suit les structures N40°E. Une nouvelle structure ayant, entre autres, une signature en Au et Ag, de direction N150°E, a été révélée. La modélisation 3D, en accord avec les résultats statistiques et géostatistiques en termes de corrélations entre variables, souligne la présence d'une anomalie de cuivre dans la partie sud de la zone d'étude.

Les investigations menées concluent à l'association de Au au couple (As-Fe) sous forme d'arsénopyrite ou de pyrite et de Ag à Cu d'une part et indirectement à Pb d'autre part. En effet, l'argent est lié aux sulfosels, lesquels sont en inclusion dans la galène.

Ces résultats sont à considérer comme métallotectes en vue de la valorisation des minerais du gisement d'Amensif.

**Mots clés :** Haut-Atlas, Amensif, Or et argent, Métaux de base, Géostatistique, Minéralogie.

**Abstract.** The Amensif polymetallic Zn, Cu, Pb, As, Ag, Au vein-type deposit is hosted in the sequences consisting of shale-carbonates and volcano-sedimentary formations attributed to the lower Cambrian. Three hydrothermal stages of the mineralization emplacement have been distinguished. The gold is related to the first stage, which is characterized mainly by the development of pyrite and arsenopyrite associated with quartz. The silver deposit is attributed to the stage of base metals (Zn, Pb and Cu), which is characterized by chalcopryrite, sphalerite, galena, sulfosalts and dolomite.

Statistical dataset based on Pb, Zn, Cu, As, Fe, Ag and Au variables analyzed from 505 drill core samples assess a relationship between: Ag and Cu, Au and As, Fe and the couple (Au-As), Pb and Zn with the couple (Cu-Ag).

The highest Ag and Au grades appear mainly on the kriging maps in the north and central part of study area. Spatial distribution of Ag-rich values is located along N15°E direction in the continuation of the main vein, while the gold distribution follows the N40°E structures. In addition, kriging method revealed a new N150°E- trending structure of Au-Ag. The presence of skarns (in the north of the study area) and native bismuth, indicates a hydrothermal activity related to felsic hidden intrusion. The 3D modeling is in good agreement with the results of statistics and geostatistics in terms of correlations between variables.

The investigations carried out conclude with the association of Au with the couple (As-Fe) in the form of arsenopyrite and pyrite, and that of Ag with Cu and indirectly with Pb in the form of sulfosalts, included in galena. Also, this study underlines the presence of a Copper anomaly in the southern part of the studied area.

These results are to be considered as metalotects in view of the valuation of Au and Ag metals in the Amensif sector.

**Keywords:** High Atlas, Amensif, Gold and silver, Base metals, Geostatistics, Mineralogy.

## ABRIDGED ENGLISH VERSION

### Introduction

The northern flank of the western High Atlas Mountain exposes several base metals deposit such as Azegour, Tighardine, Erdouz, Amensif, etc. The Amensif polymetallic deposit (Zn, Cu, Pb, As, Ag, Au) constitutes a part of the Azegour mining area (Fig. 1). This mineralization is hosted mainly within the lower Cambrian volcano-sedimentary series intercalated with carbonates layers (Permingeat 1957, Labriki 1996). They are cross-cut by rhyolitic dykes linked to the Azegour granite, dated  $271 \pm 3$  Ma by Mrini *et al.* (1992) and  $275 \pm 3.4$  Ma by Fekkak *et al.* (2018).

In this work, we focus our interest particularly to the precious metals (Au, Ag) of the Amensif deposit, in the purpose to define their correlations with base metals, the spatial distribution, their mineralogical supports and the link between gold and silver stages. In addition, metallotects are proposed for the valorization of these target metals.

### Methods

To meet the objectives mentioned above, we used chemical data from the Guemassa mining company (CMG) of 505 core samples from 29 drill holes, carried out in the southern part of the Amensif deposit (study area). Sampling was carried out in mineralized passes where gold and silver grades are particularly high. The elements considered in this work are Pb, Zn, Cu, As, Fe, Ag and Au. The main methods followed are:

- Statistical analysis and Multidimensional analyzes (PCA and CHA) were carried out using the "xlstat" software;
- Geostatistical analysis (variographic analysis and kriging) of the geochemical data of the two variables Au and Ag, carried out using the GA / ArcGIS tool;
- 3D modeling of the various chemical elements carried out using the «Data mine Studio» software;
- Petrographical and Metallographical studies;
- Scanning electron microscope (laboratories of Porto and Meknes universities) and electron microprobe analysis of the target minerals (Porto).

### Results

- Statistical analysis and Multidimensional analyzes

The correlation matrix obtained from the raw data shows good correlations of the Ag-Cu ( $r = 0.72$ ) and Au-As ( $r = 0.58$ ). The multidimensional analyzes applied on the one hand to the variables and on the other hand to the individuals revealed 6 classes for each case, each having its specific groupings. On the whole, there is a mutual correspondence between the groupings of variables and individuals, the interpretation of which makes it possible to define the host mineral phases, characteristics of the different groupings of individuals, namely: pyrite, iron oxide for class 2, chalcopyrite and

sulfosalts for class 3, auriferous arsenopyrite for class 4, galena for class 5 and finally sphalerite for class 6 (Fig. 3).

- Geostatistical analysis

The comparison of the Kriging maps of gold and silver (Figs. 7-A, 8-A) shows an obvious difference in directions: the distribution of silver is projected in the continuity of the main north vein, oriented N15°E, while that of gold conforms to those of N40°E structures. The transposition of the results of gold and silver kriging on the geological map (Figs. 7-B, 8-B) shows that the extreme northern part (zone A) falls within a context of skarns.

- 3D modeling

3D modeling of the different variables shows two lobes separated by a discontinuity, which would correspond to a fault (N150°E). The highest contents of Au and Ag show some centers of concentration with concentration gradients. These latter would correspond to intense circulation routes of hydrothermal fluids rich in silica. Comparison of the distribution of Au-As and Ag-Cu shows compliance (Fig. 10).

- Petrographic study and textural analysis

The petrographic study and textural analysis show that the Amensif mineralization has been developed in a terrain affected by a regional epizonal metamorphism. The hydrothermal episode, following a brecciation accompanied by strong silicification, results in two main stages. The first is essentially composed of pyrite, arsenopyrite and quartz; the second has chalcopyrite, sphalerite, galena and sulfosalts with a dolomitic gangue. A second brecciation favors the deposition of the late stage. The supergene stage is poorly developed (Fig. 11).

The major host minerals for silver are in order of relative abundance: freibergite, schirmerite, tetrahedrite and matildite. About gold, a chemical control (ICP) on the samples rich in pyrite and arsenopyrite has confirmed its presence (up to 4 ppm).

### Conclusion

The statistical study has shown significant correlations of Au-As and Ag-Cu. The paragenetic evolution of the Amensif mineralization is characterized by two main stages. Gold is mainly linked to massive arsenopyrite and pyrite, both belong to the first stage. However, gold is more concentrated in the first one. Silver is expressed in the sulfosalts (freibergite, tetrahedrite, schirmerite and matildite) included in galena. Freibergite is the principal source of silver in the Amensif deposit. The main directions of distribution are N15°E for silver and N40°E for gold. Moreover, a new direction N150°E has been identified.

The results of this study can be exploited as metallotects for the valorization of these precious metals in the sector of Amensif and possibly in the Azegour area.

## INTRODUCTION

Le gisement filonien d'Amensif (X : 223361,412m, Y: 60488,384m), polymétallique à métaux de base (Zn, Cu, Pb) et métaux précieux (Ag, Au), exploité par la Compagnie Minière de Guemassa (CMG), filiale du groupe Managem, s'inscrit dans le district minier du Haut-Atlas occidental. Ce district regroupe, entre autres, les gisements d'Azegour à Mo, Cu, W de type skarns (Permingeat 1957, Berrada *et al.* 2011), Tizgui à As, Au (Zinbi 2003), Tnirt à Pb, Zn, As, Au

de type filonien et pyrométasomatique (Badra 1993), Erdouz à Pb, Zn, Ag (Badra 1993), le gîte filonien de Talat N'Imjjad à Cu, Au (Ilmen *et al.* 2015), le gîte d'Ait Dawd à Cu, Ni, Au (Ilmen *et al.* 2022), le gîte de Talat N'Wareg à Cu, Pb, Zn, ainsi que le gîte de Tameksaout à Cu, Pb, Zn. A environ 20 km du côté Est du gisement d'Azegour, se trouve le gisement de Tighardine à Cu, Pb, Zn, Ag, Ba, de type CRD «Carbonate- Replacement Deposit» selon Alansari *et al.* (2009). Ainsi, ces

gîtes et gisements de la zone d'Azegour se distinguent, entre autres, par la présence des métaux précieux (Ag, Au).

La minéralisation du gisement d'Amensif de type CRD selon Ilmen *et al.* (2014) est encaissée dans des formations schisto-carbonatées et volcano-sédimentaires attribuées au Cambrien inférieur à moyen (Permingeat 1957, Labriki 1996). Ces formations sont recoupées par des dykes rhyolitiques associés au granite permien d'Azegour, daté de  $271 \pm 3$  Ma (Mrini *et al.* 1992) et  $275 \pm 3,4$  Ma (Fekkak *et al.* 2018).

Dans le gisement d'Amensif, les rapports spatio-temporels des métaux précieux Au et Ag avec les métaux de base, méritent d'être élucidés pour une meilleure valorisation de ces premiers en termes d'exploitation et de prospection, in situ et à l'échelle de la zone d'Azegour.

Dans ce travail, on se propose de définir la distribution spatiale des éléments Au et Ag, leurs supports minéralogiques et les relations entre les stades aurifère et argentifère afin d'en déduire d'éventuels métalotectes, et ce sur la base d'analyses statistiques, géostatistiques, minéralogiques et la modélisation 3D.

Pour ce faire, nous avons exploité les données des analyses géochimiques (ICP) réalisées par CMG sur 505 échantillons de carottes provenant de 29 sondages du secteur sud du gisement d'Amensif. Les éléments considérés dans ce travail sont : Pb, Zn, Cu, As, Fe, Ag et Au. Les minéraux cibles ont été analysés au MEB et à la microsonde électronique.

Les résultats obtenus sont discutés dans le but de rechercher d'éventuelles similitudes avec les autres gisements et gîtes de la zone d'Azegour.

## CONTEXTE GEOLOGIQUE

Le gisement d'Amensif est situé à 5 km au sud du granite d'Azegour (Fig. 1), soit à 80 km au sud de Marrakech. Les formations géologiques sont essentiellement méta-sédimentaires et volcano-clastiques, d'âge cambrien (Cornée *et al.* 1987a, 1987b, Badra 1993, Labriki 1996, Ouazzani *et al.* 2001, El Archi 2003), surmontées par une couverture crétacée (grès, marnes, calcaires et argiles).

Dans le secteur d'Amensif, Ilmen (2016) distingue deux unités lithostratigraphiques (Figs. 1, 2) :

- *l'unité inférieure*, attribuée au Cambrien inférieur, est composée de barres carbonatées (dolomies et calcaires), de niveaux pyroclastiques (tufs) et de coulées andésitiques et trachytiques ;

- *l'unité supérieure*, d'âge cambrien moyen, est composée principalement de schistes, de calcschistes et de grauwackes.

Ces formations, structurées par l'orogénèse hercynienne en direction N20°E, sont recoupées par des dykes rhyolitiques de direction N-S à NNE-SSW. L'ensemble est repris par la tectonique alpine cassante, exprimée principalement par des failles sub-équatoriales senestres (Ait Ayad 1987, Prost *et al.* 1989, Ouanaïmi *et al.* 1992, Labriki 1996, Dias *et al.* 2011).

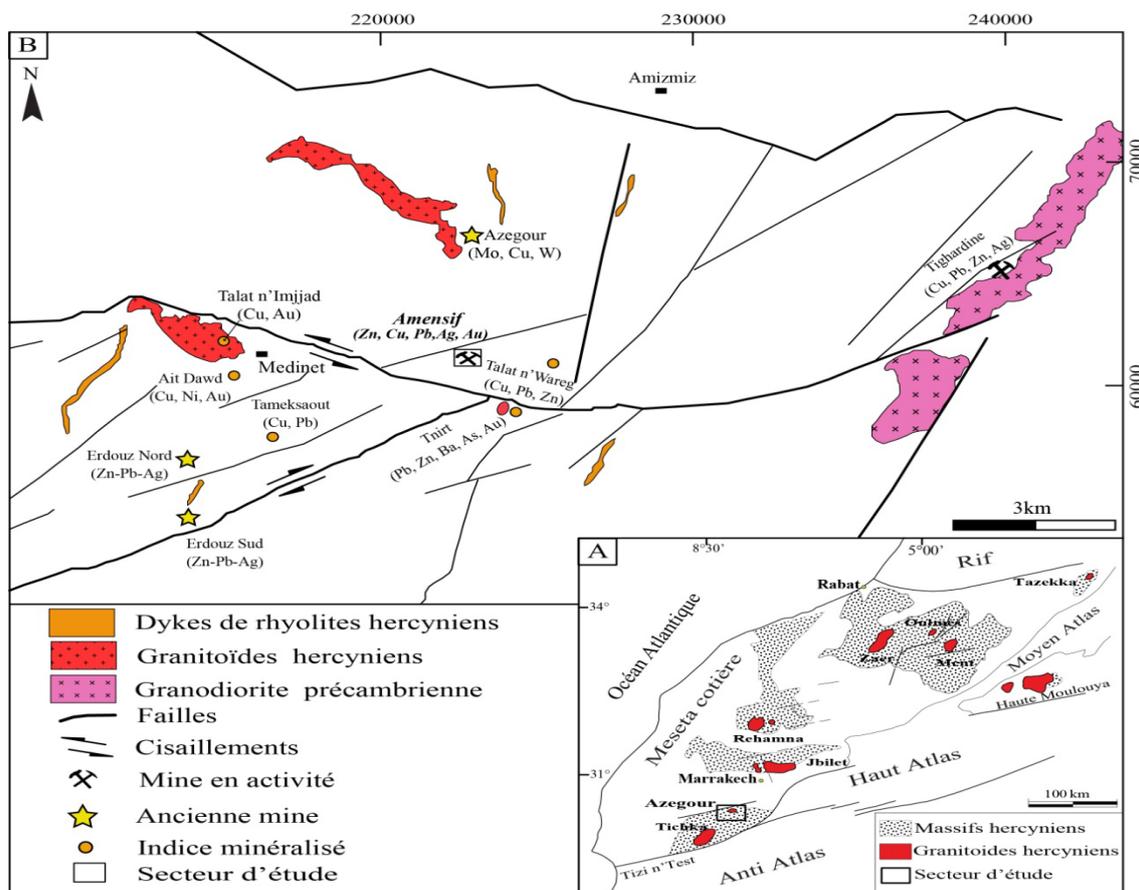


Figure 1. A- Situation géographique de la zone d'Azegour ; B- Situation du secteur d'étude et distribution des principaux granitoïdes et sites minéralisés de la zone d'Azegour (Ilmen 2016).

Figure 1. A- Geographic location of the study area ; B- Distribution map of the main granitoids and mineralized sites of the Azegour area (Ilmen 2016).

Dans la partie nord du gisement d'Amensif, la présence de skarns à andradite, vésuvianite, épidote, trémolite, chlorite, quartz et séricite (Ilmen *et al.* 2014) atteste d'une activité hydrothermale potassique (Fontelles & Garcia 1985) en rapport avec la mise en place d'un corps magmatique acide enfoui. En effet, on note la présence d'un important essaim de dykes rhyolitiques orienté N-S (Fig. 2). Un tel contexte magmatique et métasomatique est également connu à Azegour (Permingeat 1957) où le granite est daté  $271 \pm 3\text{Ma}$  et  $275 \pm 3,4\text{Ma}$  respectivement par Mrini *et al.* (1992) et Fekkek *et al.* (2018).

Le secteur d'étude correspond à la partie sud du gisement d'Amensif, à la limite des skarns à grenat. Il est constitué de coulées andésitiques, trachytiques, de schistes et de grauwackes (Fig. 2).

**ANALYSE STATISTIQUE**

Les données chimiques exploitées correspondent à 505 échantillons de minerais provenant de 29 sondages ayant fait l'objet d'analyses pour les 7 éléments suivants : As, Cu, Pb, Zn, Fe, Ag et Au. On dispose ainsi, d'un échantillon statistique avec  $N = 505$  individus et  $p = 7$  variables. Le tableau 1, présente le résumé statistique des 7 variables correspondant aux 3535 observations, et montre pour les différentes variables des coefficients de variation élevés (CV) traduisant la dispersion des données et des ordres de grandeur différents.

L'analyse multidimensionnelle (analyse en composantes principales (ACP), et classification hiérarchique (CHA) avec distance euclidienne et méthode d'agrégation de Ward), présentée ci-dessous, porte sur les données centrées réduites en gardant la totalité des données et, par suite, au moyen de la matrice des corrélations. Le tout est réalisé avec le logiciel XLSTAT.

**Matrice des corrélations linéaires**

L'ensemble des coefficients de corrélation (Tab. 2) est positif avec des valeurs différentes selon les couples de variables, coefficients qui sont analysés en tenant compte de la taille de l'échantillon ( $N = 505$ ). Pour cela, un test de Fisher Snedecor permet de mettre en évidence les couples pour lesquels l'hypothèse de l'indépendance de deux variables est à rejeter (le risque choisi est  $\alpha = 0,05$  qui correspond à un rejet significatif). Les valeurs des coefficients de corrélation des couples de variables pour lesquels  $H_0$  est rejeté de façon au moins significative sont identifiées (Tab. 2). Les couples (Pb-Fe), (Zn-Fe), (As- Zn) et (Au-Zn) montrent des coefficients qui ne permettent pas de rejeter l'hypothèse de l'indépendance ce qui est intéressant en vue de l'analyse minéralogique. Pour les couples (Ag-Cu), (Au-As), l'hypothèse  $H_0$  est rejetée de façon très hautement significative (THS risque 0,001) ce qui est cohérent avec les coefficients de corrélation élevés de ces deux couples de variables et également intéressant du point de vue de l'analyse minéralogique.

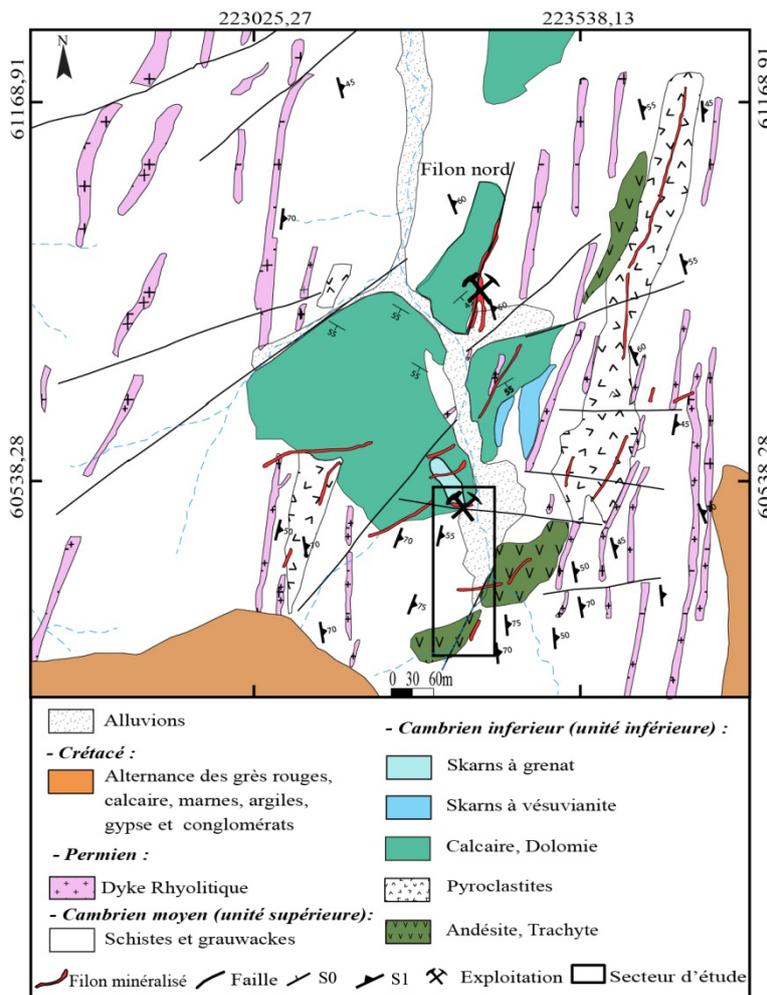


Figure 2. Carte géologique du secteur d'Amensif (Ilmen 2016).  
 Figure 2. Geological map of the Amensif sector (Ilmen 2016).

Tableau 1. Résumé statistique des 7 variables considérées.  
 Tableau 1. Statistical summary of the 7 variables considered.

	Fe	Cu	As	Pb	Zn	Ag	Au
Moyenne	55914	3024	2709	1382	11296	26	0,2
Médiane	40200	664	490	294	2400	11	0,1
Min	5300	13	30	10	0,53	1	0,1
Max	297000	33800	45800	51300	173700	302	3,9
Etendue	291700	33787	45770	51290	173699	301	3,8
Ecart type	49407	5686	5976	4399	24971,06	41,48	0,47
CV	88%	188%	221%	318%	221%	161%	191%

Tableau 2. Coefficients de corrélation (les valeurs en gras correspondent au rejet de l'hypothèse de l'indépendance des variables).  
 Tableau 2. Correlation coefficients (the values in bold correspond to the rejection of the hypothesis of the independence of the variables).

Variabes	Fe	Cu	As	Pb	Zn	Ag	Au
Fe	<b>1</b>						
Cu	<b>0,107</b>	<b>1</b>					
As	<b>0,376</b>	<b>0,174</b>	<b>1</b>				
Pb	0,077	<b>0,196</b>	<b>0,157</b>	<b>1</b>			
Zn	0,067	<b>0,128</b>	0,054	<b>0,198</b>	<b>1</b>		
Ag	<b>0,203</b>	<b>0,721</b>	<b>0,313</b>	<b>0,298</b>	<b>0,194</b>	<b>1</b>	
Au	<b>0,205</b>	<b>0,215</b>	<b>0,576</b>	<b>0,151</b>	0,057	<b>0,261</b>	<b>1</b>

### Analyse statistique multidimensionnelle

Les résultats de l'analyse statistique multidimensionnelle (ACP et CHA) se résument en plusieurs graphes, le dendrogramme des variables, celui des individus, celui de la projection des individus sur le premier plan factoriel F1-F2 avec le cercle des corrélations associé (Fig. 3).

Le dendrogramme de la classification des variables (Fig. 3-A) complète, en la visualisant, l'analyse de la matrice des corrélations, à savoir les faibles coefficients de corrélation de Fe tant de Pb que de Zn et les coefficients de corrélation élevés des variables (As-Au) d'une part et (Cu-Ag) d'autre part. Ces deux groupes de variables s'opposent avec des composantes respectivement positives et négatives sur le deuxième axe factoriel. Par ailleurs, il montre aussi que le couple (As-Au) et plus proche de Fe que du couple (Cu-Ag).

La prise en compte simultanée de la répartition en classes obtenue avec la CHA des individus et la représentation des résultats de l'ACP (le plan factoriel F1-F2 absorbe 54% de la variance totale (Tab. 3) et le cercle des corrélations associé) montre une répartition très nette des individus (Fig. 3-B, C, D). En effet, une première observation du dendrogramme de la CHA montre qu'il existe deux grands groupes d'individus, le premier constitué des classes 1 et 2 et le deuxième des 4 autres classes. Le premier groupe correspond aux individus les plus nombreux (415 individus) pour lesquels les teneurs moyennes et les teneurs médianes en Ag et Au sont les plus faibles (composantes négatives ou très faibles sur l'axe F1, Fig. 3-D), ce que confirme la Figure 4 ; la classe 2 se distingue de la

classe 1 au sein de ce groupe par des teneurs en Fe nettement plus élevées (Tab. 4). Les 4 classes du deuxième groupe se différencient par leurs composantes positives ou négatives sur l'axe F2. Les individus de la classe 4 (19 individus) avec des composantes croissantes sur F1 et F2 montrent, d'un point de vue statistique, des teneurs croissantes en Au, As, Fe et décroissantes en Ag, Cu, Pb et Zn. Les individus des classes 3 (47 individus) d'une part et 5 et 6 (11 individus) d'autre part avec des composantes croissantes sur F1, mais avec des composantes négatives et décroissantes sur l'axe F2 montrent des teneurs en Ag, Cu, Pb et Zn croissantes et décroissantes en Au, As, Fe.

Les médianes de chaque classe et les moyennes de celles dont la médiane est la plus élevée sont données dans le tableau 4. A l'exception de la classe 6, les moyennes sont relativement plus élevées que les médianes en raison de l'influence de certaines teneurs élevées.

Une distinction claire s'établit donc entre les classes ; ainsi, la classe 3 montre les plus fortes teneurs en Ag et Cu et la classe 4 montre les teneurs les plus élevées en Au et As (Fig. 4). Ces deux classes s'opposent bien dans le plan F1-F2 avec des composantes positives sur F2 pour la classe 4 et des composantes négatives pour la classe 3. La teneur prépondérante de chaque élément par classe est celle de Fe pour la classe 2, Zn pour la classe 6, Pb pour la classe 5, et As et Cu respectivement pour les classes 4 et 3.

En conclusion à cette analyse statistique, hormis la classe 1, les moyennes des teneurs les plus élevées des éléments par classe donnent une indication sur la présence d'espèces

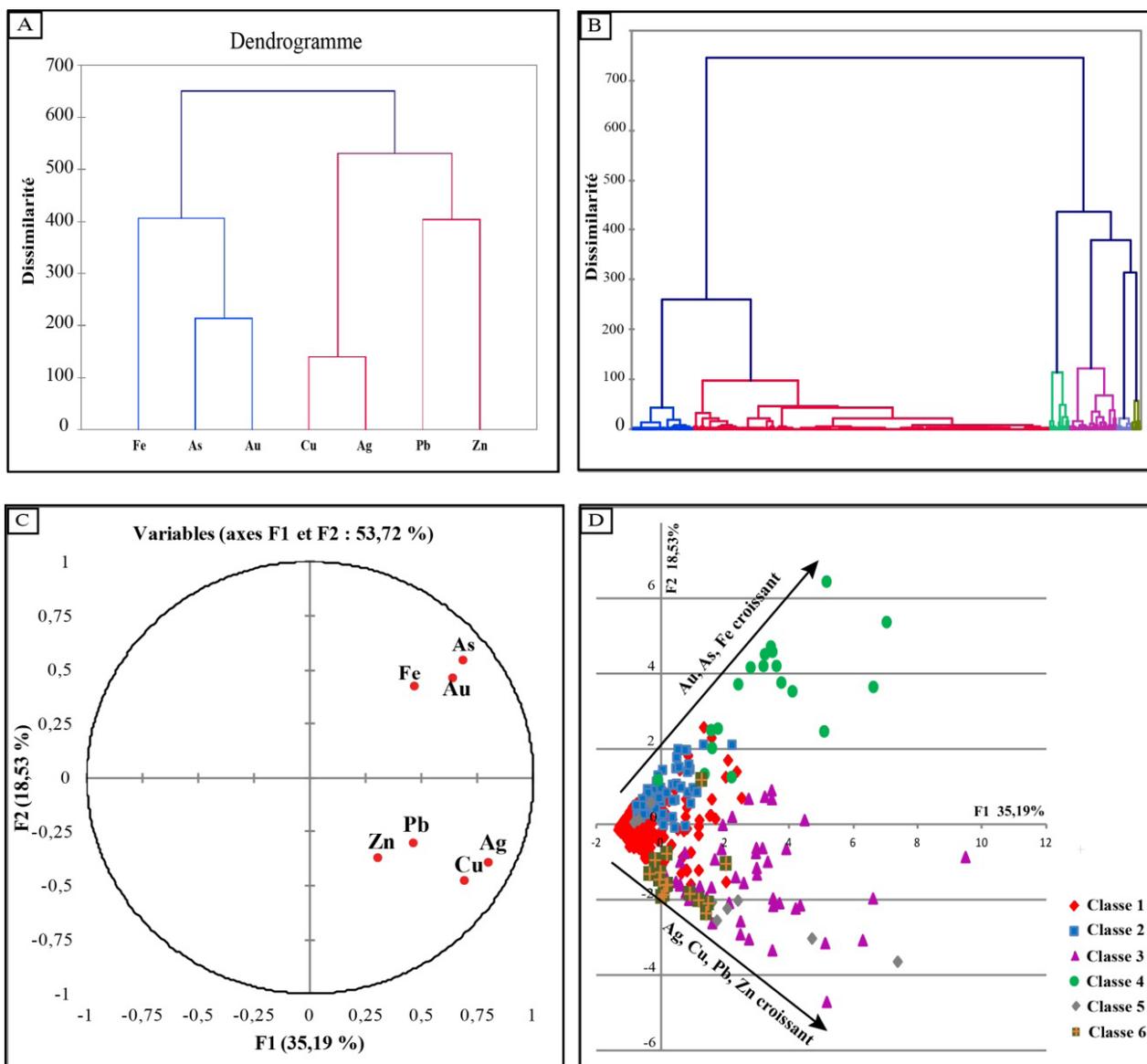


Figure 3. A- Dendrogramme de la classification hiérarchique ascendante des variables ; B- Dendrogramme de la classification hiérarchique ascendante des individus ; C- Cercle des corrélations des variables ; D- Représentation des individus des différentes classes dans le plan F1-F2.

Figure 3. A- Dendrogram of ascending hierarchical classification of variables; B- Dendrogram of the ascending hierarchical classification of individuals; C- Circle of correlations of variables; D- Representation of individuals of different classes in the F1-F2 plane

Tableau 3. Valeurs propres résultant de la diagonalisation de la matrice des corrélations.

Tableau 3. Eigenvalues resulting from the diagonalization of the correlation matrix.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Valeur propre	2,46	1,30	0,99	0,84	0,76	0,40	0,25
(%)	35%	19%	14%	12%	11%	6%	4%
cumulés %	35%	54%	68%	80%	91%	96%	100%

Tableau 4. Teneurs médianes (en ppm) des variables selon les classes issues de la CHA (La teneur moyenne de l'élément caractéristique de chaque classe est représentée en italique et soulignée).

Tableau 4. Median levels (in ppm) of variables according to classes from the CHA (The average content of the characteristic element of each class is represented in italic and underlined).

Classes	1	2	3	4	5	6
Fe	32650	128600 <u>145289</u>	57500	112300	46400	43000
Cu	324	842	16800 <u>17487</u>	1500	6600	1600
As	337	1486	1800	20000 <u>20698</u>	2500	800
Pb	231	350	1200	891	24100 <u>29483</u>	300
Zn	1750	3300	5900	5400	33500	129200 <u>123333</u>
Ag	8	13	112 <u>119</u>	16	64	12
Au	0,05	0,06	0,23	2,05 <u>2,00</u>	0,36	0,19

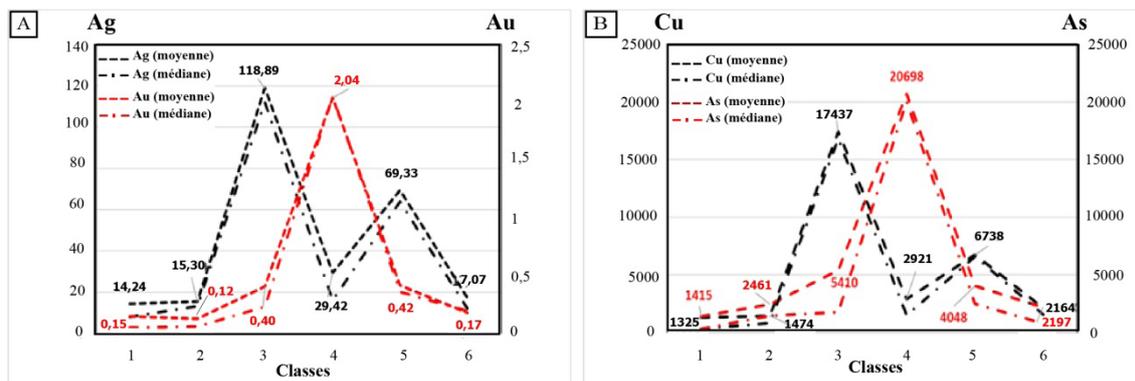


Figure 4. Teneurs moyennes (ppm) et médianes en Ag, Au (A) et Cu, As (B) des classes issues de la CHA.  
Figure 4. Mean (ppm) and median contents in Ag, Au (A) and Cu, As (B) of the classes resulting from the CHA.

minérales qui pourraient être les suivantes : pyrite, oxydes de fer pour la classe 2, chalcopryrite et sulfosels pour la classe 3, arsénopyrite aurifère pour la classe 4, galène pour la classe 5 et sphalérite pour la classe 6, alors que les classes 3 et 4 correspondraient respectivement aux sulfosels et à l'arsénopyrite aurifère. Ces résultats seront confrontés à ceux de l'étude minéralogique.

### ANALYSE GEOSTATISTIQUE

L'interpolation spatiale des valeurs des deux variables Au et Ag a été réalisée en utilisant l'outil GA/ArcGIS dans le système de coordonnées "Maroc Lambert Conformal Conic, Zone 1". La méthodologie suivie consiste en la validation croisée, la modélisation des variogrammes et la génération des cartes de krigeage.

#### Etablissement des variogrammes

L'établissement des variogrammes nécessite le choix d'un modèle adéquat, lequel dépend des paramètres de la validation croisée (Johnston *et al.* 2001). Les résultats obtenus permettent d'opter pour le modèle sphérique pour Au et le modèle exponentiel pour Ag (Fig. 5-A, B).

### Cartographie par krigeage

La Figure 6 représente la répartition des 27 sondages considérés (2 verticaux exclus) et la position des échantillons analysés sur chaque sondage. Pour l'établissement des cartes de krigeage, les teneurs de chaque variable (Zn, Pb, Cu, As, Fe, Ag et Au) ont été projetées verticalement sur un plan horizontal.

Compte tenu du maillage irrégulier des sondages, le krigeage appliqué est de type ordinaire ne considérant que la moyenne des points d'un voisinage proche.

Les cartes ainsi obtenues pour l'or et l'argent (Figs. 7, 8) fournissent d'une part les principales zones de distribution de chaque variable et d'autre part les directions correspondantes.

#### Carte de Krigeage de l'or

La Figure 7-A montre, pour les plus fortes teneurs de l'or, une distribution suivant deux directions N35°E à N40°E (zones: A, B, C et D) et N150°E (zone E). La première direction, majeure, est conforme à celle des filons minéralisés, tandis que la seconde, révélée par krigeage, nécessite un complément d'étude par géophysique et par sondage pour contrôle.

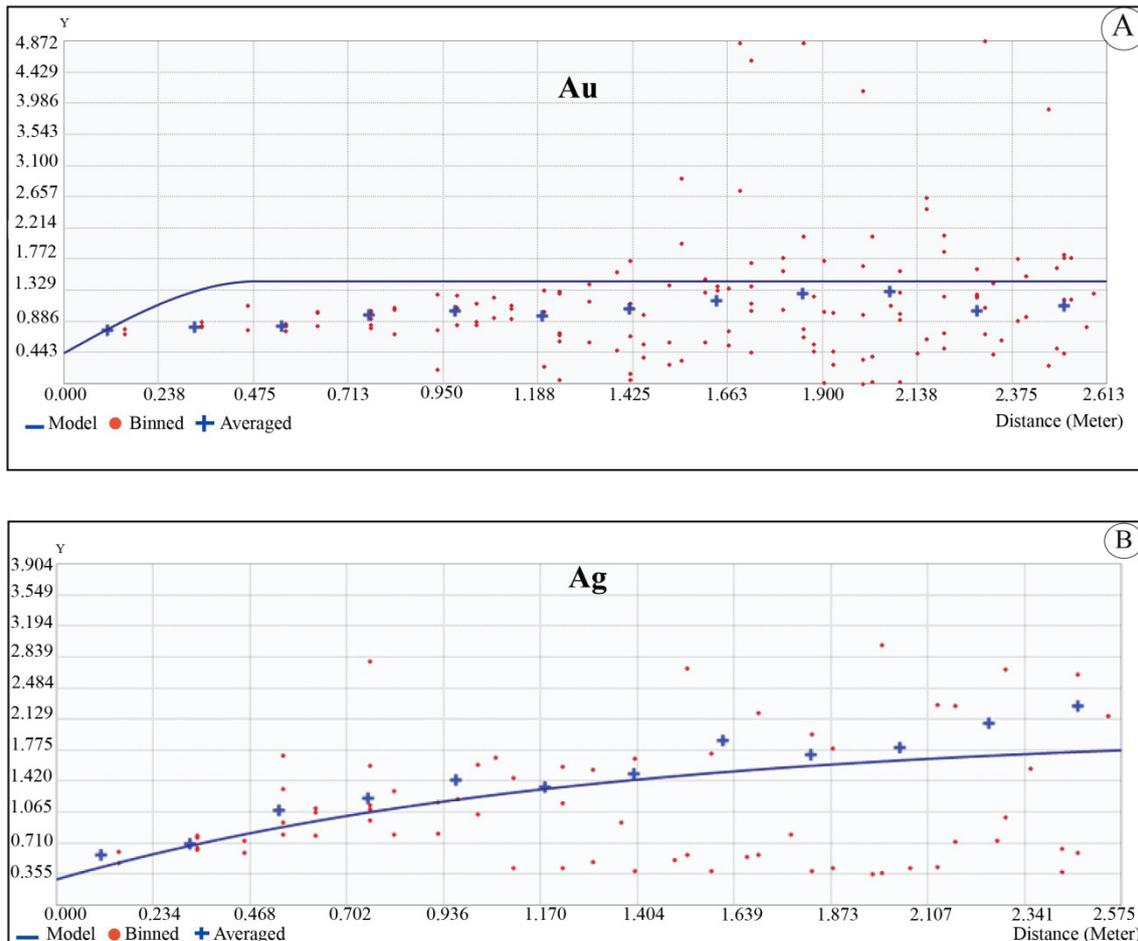


Figure 5. Variogrammes expérimentaux ajustés pour Au (A) et Ag (B).  
 Figure 5. Adjusted experimental variograms for Au (A) and Ag (B).

La zone A, située à proximité des facies de skarns, est vraisemblablement en rapport avec ces derniers (Fig. 7-B). La zone F, située à la lisière de la zone d'étude, atteste de la présence de la minéralisation encore plus au sud. Cette dernière mérite un complément de travaux d'exploration.

#### Carte de krigeage de l'argent

La carte de krigeage de l'argent (Fig. 8-A) indique une distribution irrégulière des plus fortes teneurs. Deux modes de distribution s'observent : (i) suivant des structures linéaires de directions N15°E (zones : A, B, C, F) et N150°E (zone E) ; (ii) sous forme de taches (zones D et G). A l'instar de l'or, le krigeage révèle également la direction N150°E pour l'argent. Il est à noter que la zone A (à proximité des skarns) montre des teneurs particulièrement élevées en argent.

Les teneurs moyennes en Ag (~40 ppm) ont une plus large distribution que l'or, ce qui représenterait une teneur de fond au niveau de la structure minéralisée principale, voire aussi dans son encaissant immédiat.

#### MODELISATION 3D PAR ELEMENT

La modélisation 3D a été réalisée en exploitant le logiciel Data mine Studio, version 3.21. La méthode d'interpolation appliquée est l'inverse des distances à la puissance 2 en s'appuyant sur les strings et les wireframes.

A la lumière des résultats de l'analyse statistique, les blocs-diagrammes établis pour les variables Au, As, Ag et

Cu permettent de comparer la distribution spatiale de Au par rapport à As et Ag par rapport à Cu.

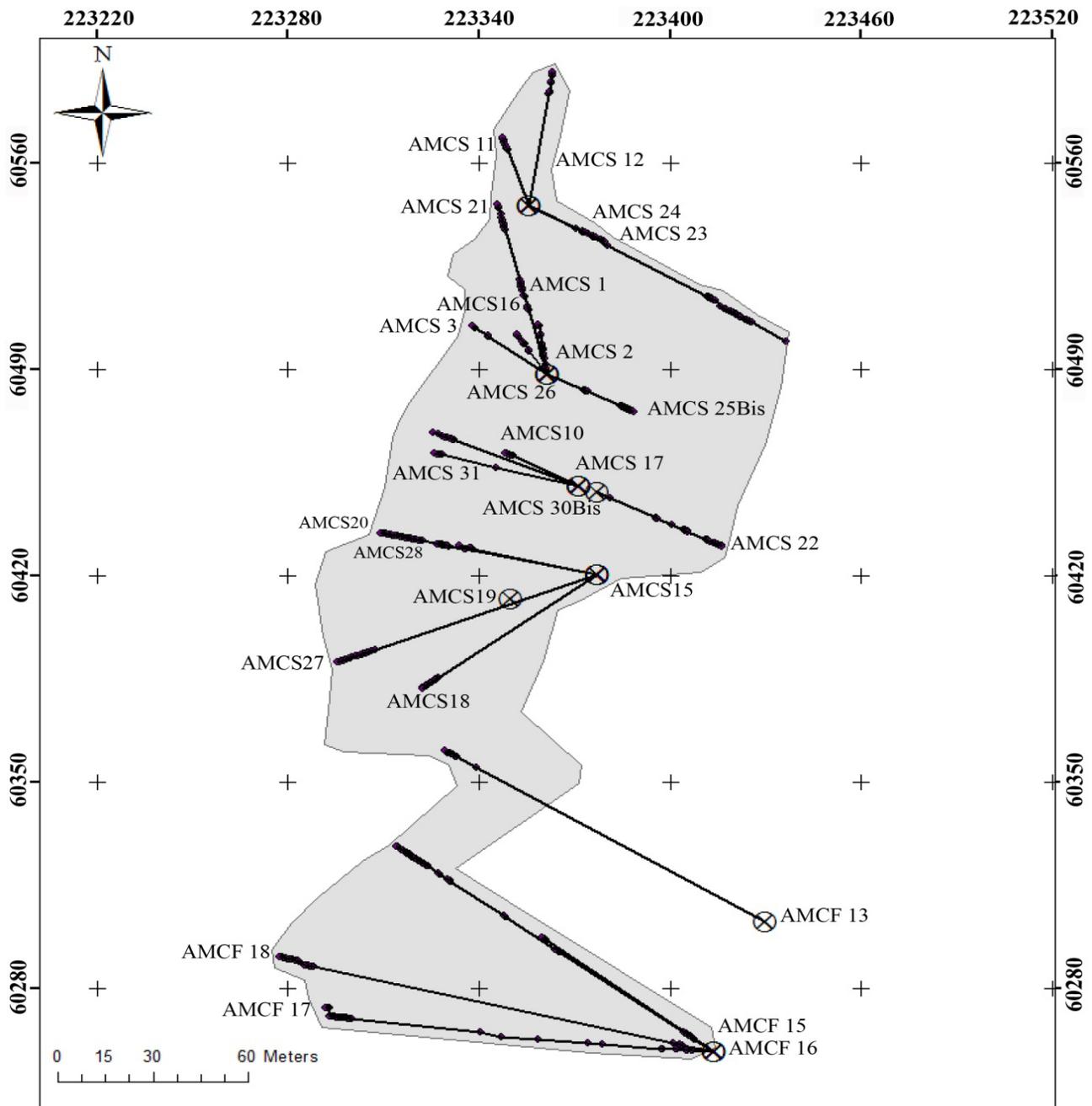
La projection en plan (XY) du corps minéralisé se traduit par le tracé d'une structure principale composée de deux segments orientés N25°E, de pendage moyen 55°E (Fig. 9), dont la discontinuité observée correspondrait à la zone de faille N150°E. Les représentations 3D de ces structures montrent un corps composé de deux lobes nord et sud (Fig. 10).

#### Blocs-diagrammes de l'or et de l'arsenic

Le bloc 3D de l'or (Fig. 10-A) montre des zones de concentration à différentes profondeurs, avec des foyers distincts des plus fortes teneurs. Celui de l'arsenic (Fig. 10-B), est à l'image du premier. Les foyers à teneurs distinctes correspondent, au niveau des logs de sondages, à des passes fortement silicifiées.

#### Blocs-diagrammes de l'argent et du cuivre

La représentation 3D de l'argent, montre une distribution d'allure semblable à celle de l'or. Les foyers de plus fortes teneurs sont également zonés mais relativement plus étendus (Fig. 10-C). A l'échelle du lobe nord, on constate une concordance des zones de plus fortes teneurs des éléments Ag et Cu (Fig. 10-C, D). Il est à noter qu'au niveau du lobe sud la signature du cuivre est nettement plus étendue que dans le lobe nord.



<u>AMCS 1:</u>	<u>AMCS 11:</u>	<u>AMCS 17:</u>	<u>AMCS 21:</u>	<u>AMCS 25Bis:</u>	<u>AMCS 30 Bis:</u>	<u>AMCF 16:</u>
Z: 1830	Z: 1825	Z: 1835	Z: 1830	Z: 1830	Z: 1835	Z: 1818
Incl: -45°	Incl: -55°	Incl: -78°	Incl: -80°	Incl: -72°	Incl: -63,3°	Incl: -77,5°
<u>AMCS 2:</u>	<u>AMCS 12:</u>	<u>AMCS 18:</u>	<u>AMCS 22:</u>	<u>AMCS 26:</u>	<u>AMCS 31:</u>	<u>AMCF 17:</u>
Z: 1830	Z: 1825	Z: 1840	Z: 1831	Z: 1830	Z: 1835	Z: 1818
Incl: -85°	Incl: -57,4°	Incl: -72,7°	Incl: -80°	Incl: -65°	Incl: -84,75°	Incl: -63,7°
<u>AMCS 3:</u>	<u>AMCS 15:</u>	<u>AMCS 19:</u>	<u>AMCS 23:</u>	<u>AMCS 27:</u>	<u>AMCF 15:</u>	<u>AMCF 18:</u>
Z: 1830	Z: 1840	Z: 1840	Z: 1825	Z: 1840	Z: 1818	Z: 1818
Incl: -80°	Incl: -55°	Incl: -70°	Incl: -69°	Incl: -49,5°	Incl: -63°	Incl: -51,1°
<u>AMCS 10:</u>	<u>AMCS 16:</u>	<u>AMCS 20:</u>	<u>AMCS 24:</u>	<u>AMCS 28:</u>	<u>AMCF 13</u>	
Z: 1835	Z: 1840	Z: 1840	Z: 1825	Z: 1840	Z: 1818	
Incl: -56,8°	Incl: -55°	Incl: -55°	Incl: -77,7°	Incl: -67°	Incl: -65°	

Figure 6. Carte d'implantation des sondages avec projection des points de prélèvement des échantillons analysés.  
Sondages verticaux exclus : (AMCS7 ; Z : 1831) ; (AMCS8 ; Z : 1840).

Figure 6. Survey location map with projection of the sampling points of the analyzed samples. vertical surveys excluded: (AMCS7; Z : 1831) ; (AMCS8; Z : 1840).

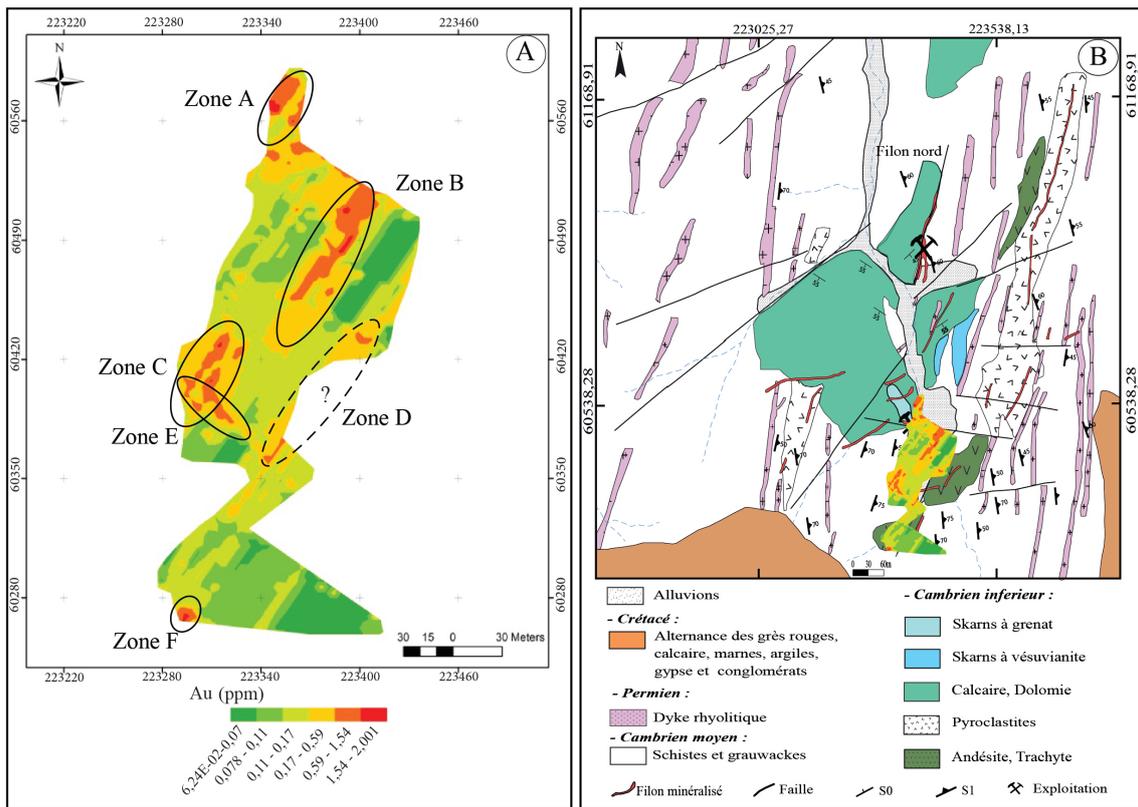


Figure 7. Carte de krigeage de l'or (A) et sa transposition sur la carte géologique (B).  
 Figure 7. Gold kriging map (A) and its transposition on the geological map (B).

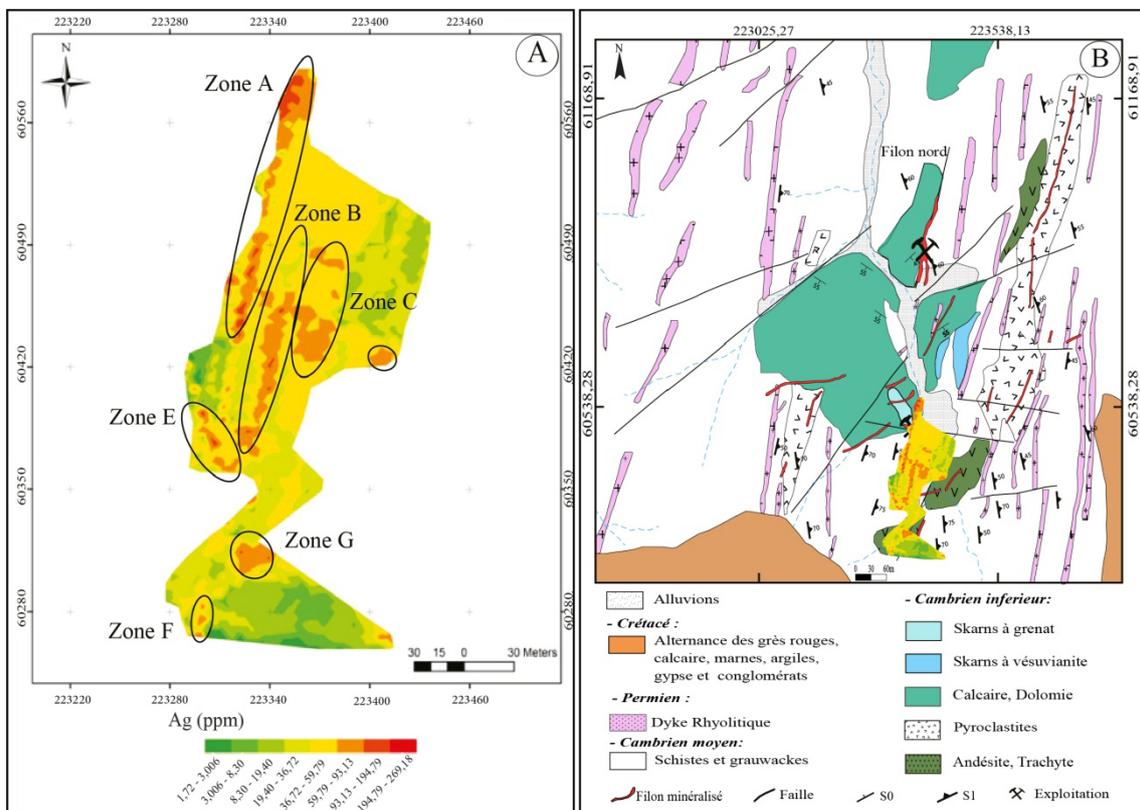


Figure 8. Carte de krigeage de l'argent (A) et sa transposition sur la carte géologique (B).  
 Figure 8. Silver kriging map (A) and its transposition on the geological map (B).

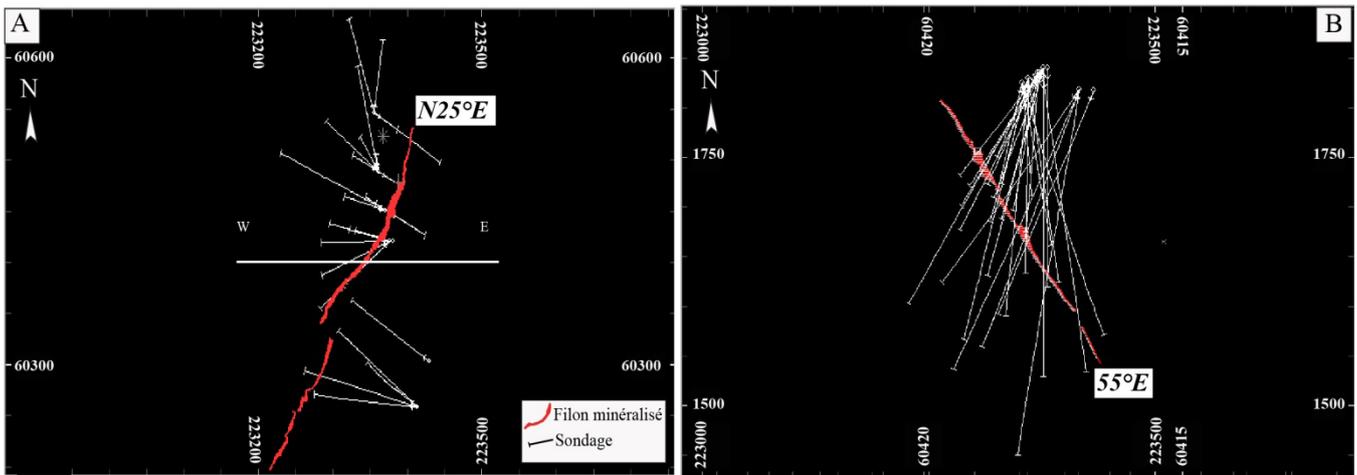


Figure 9. Orientation (A) et pendage moyen (B) de la structure minéralisée principale.  
 Figure 9. Orientation (A) and average dip (B) of the main mineralized structure.

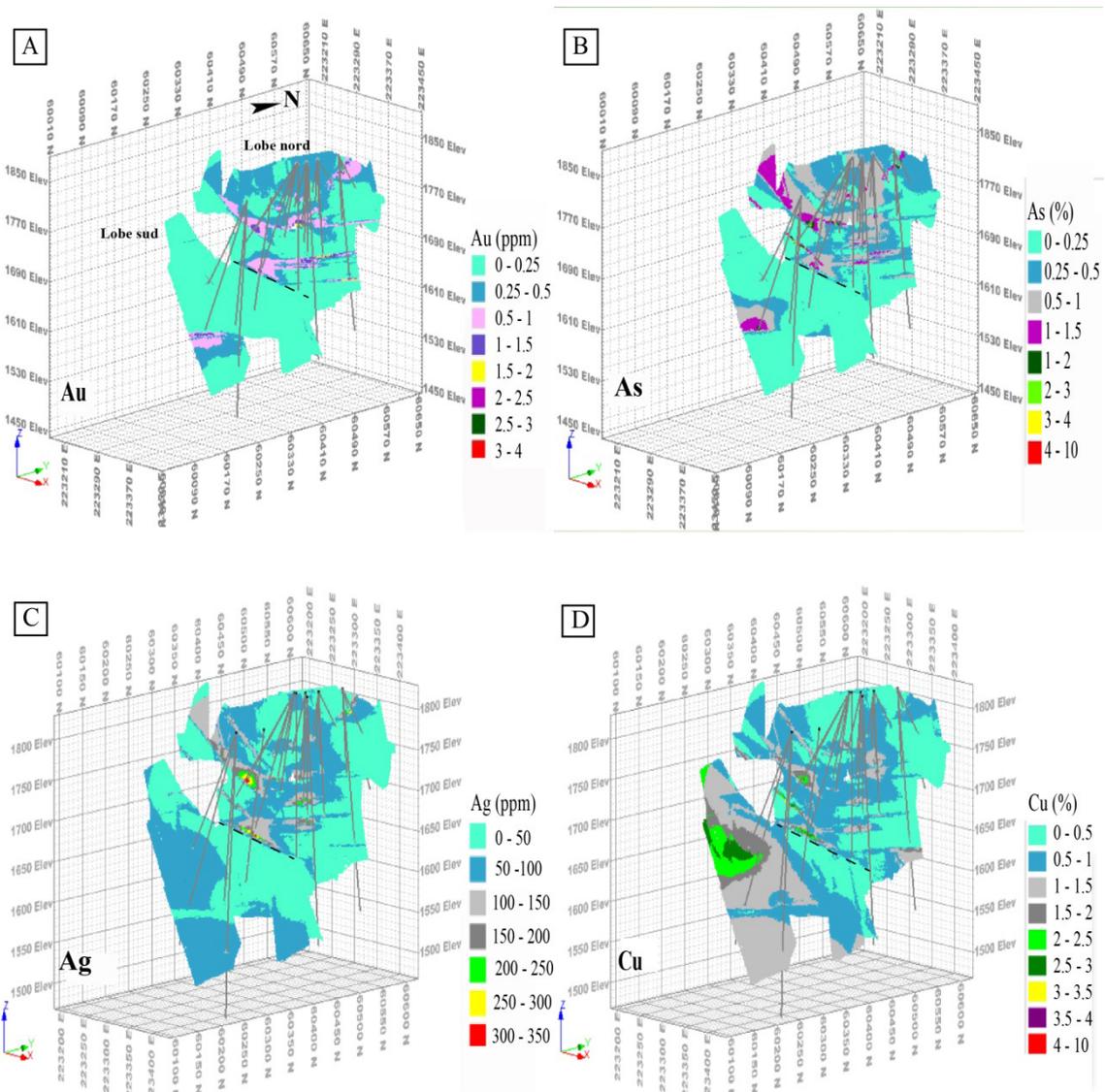


Figure 10. Représentation 3D de l'or (A), de l'arsenic (B), de l'argent (C) et du cuivre (D).  
 NB. Pour des raisons de lisibilité, la légende des blocs a été personnalisée selon la variable considérée.  
 Figure 10. 3D representation of gold (A), arsenic (B), silver (C) and copper (D).

**MINÉRALOGIE**

**Conditions d'échantillonnage et d'analyses**

Les échantillons étudiés ont été prélevés au niveau des passes de carottes de sondages où les teneurs en or et en argent sont particulièrement élevées.

Les analyses qualitatives et quantitatives ont été effectuées à l'Université de Porto (Portugal) et à l'Université Moulay Ismail (Maroc). Les microscopes électroniques à balayage utilisés sont de types Quanta 400 FEG ESEM/EDAX Genesis X4M (15keV, 60 sec) et JEOL JSM-IT500 HR (15keV, 30 sec). Les sulfures ont été analysés à Porto à l'aide de la microsonde électronique (JEOL JXA-8500F) sous les conditions suivantes : faisceau de 1 µm, 20 Kv et 20nA. Le temps de comptage est de 20 secondes. Les standards utilisés pour les sulfures sont : (au-20-20) pour Au ; (ag-20-20) pour Ag ; (cu-cu2o-20-20) pour Cu, (fes2-20-20) pour Fe et S ; (as-20-20) pour As ; (zn-zns-20-20) pour Zn ; (pb-pbs-20-20) pour Pb ; (mn-mntio3-2020) pour Mn ; (se-bi2se3-2020) pour Se ; (Sb2te3-20-20) pour Sb ; (Se-bi2se3-2020) pour Bi ; (ge-ge-20-20) pour Ge ; (in-inp-20-20) pour In.

**Relations de phases minérales**

La minéralisation filonienne de la zone sud du gisement ploymétallique d'Amensif s'est mise en place dans un encaissant grésopélitique et carbonaté, affecté par un métamorphisme régional épizonal. Le métamorphisme de contact est exprimé dans la partie nord de cette zone sous forme de skarns essentiellement à andradite, vésuvianite, épidote, trémolite, chlorite, quartz et séricite (Ilmen *et al.* 2014).

L'analyse texturale indique que suite à une bréchification accompagnée d'une forte silicification, l'épisode hydrothermal se traduit par deux principaux stades de dépôt de la minéralisation : le premier stade est essentiellement à pyrite et arsénopyrite dans une gangue de quartz ; le second stade, économique, est caractérisé par la paragenèse minérale à chalcopyrite, sphalérite, galène et sulfosels dans une gangue dolomitique, le tout est affecté par une seconde bréchification (Fig. 13-C). Le stade supergène, peu développé, se traduit par la présence de la bornite, la covellite et l'azurite (Fig. 11).

La pyrite, associée au quartz, se présente en cristaux (~500 µm) englobant parfois des micros inclusions de pyrrhotite et d'arsénopyrite (Fig. 12-A, B et C). L'arsénopyrite (~2 mm), d'aspect massif, est associée à la pyrite et au quartz (Fig.12-B). Elle est parfois remaniée dans des veines de sidérite (Fig. 12-D). Pyrite et arsénopyrite présentent généralement des contacts communs. Le bismuth natif, relativement précoce, apparaît en inclusions dans le quartz 1 (Fig. 12-E). Les microfissures des agrégats de pyrite sont colmatées par la chalcopyrite et/ou la sphalérite (Fig. 12-F).

La chalcopyrite, la sphalérite et la galène, d'aspects massifs, sont associées à la dolomite et occupent les espaces inter-quartz 2 (Fig. 13-A). La galène, plus tardive, remplit les microfissures de la sphalérite et de la chalcopyrite (Fig. 13-B). La sphalérite est fortement zonée, sa composition en Fe varie entre 0,2 et 8,3% wt (Tab. 3, Annexe 2). Elle est intensément bréchifiée (Fig. 13-C). Une seconde génération de chalcopyrite s'observe dans les microfissures de la sphalérite (Fig. 13-D).

Minéral	Stades hydrothermaux			Stade supergène
	Stade 1	Stade 2	Stade tardif	
Quartz	■	■	■	
Chlorite	■			
Muscovite	■			
Dolomite		■		
Sidérite		■		
Carbonate			■	
Pyrite	■			
Arsénopyrite	■			
Pyrrhotite	■			
Chalcopyrite		■	■	
Sphalérite		■		
Galène		■		
Bismuth	■			
Matildite		■		
Schirmerite		■		
Freibergite		■		
Tétraédrite		■		
Bornite				■
Covellite				■
Azurite				■

Figure 11. Associations minérales et stades de dépôt de la minéralisation correspondant à la partie sud du filon principal d'Amensif.  
 Figure 11. Mineral associations and depositional stages of mineralization corresponding to the southern part of the Amensif main vein.

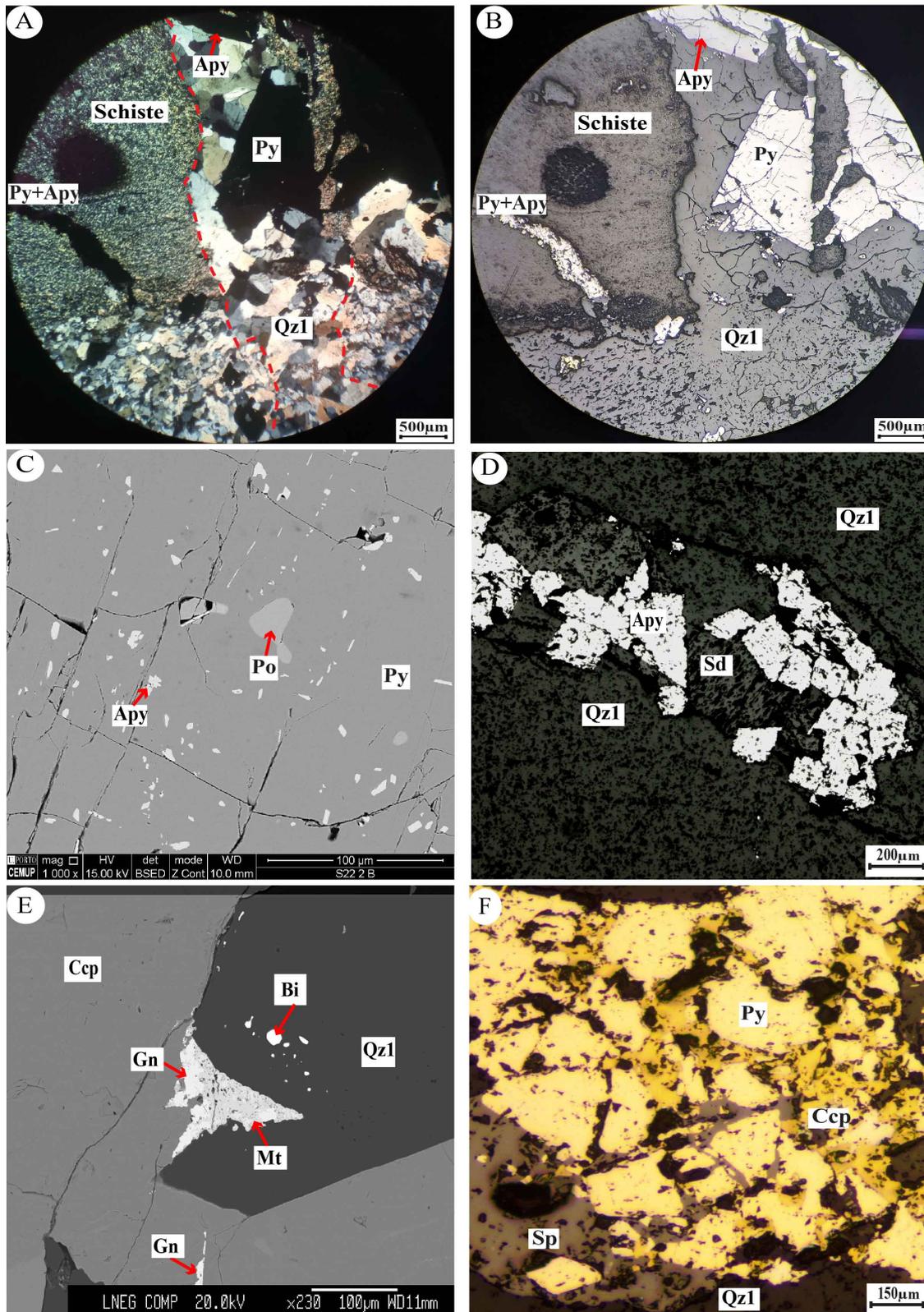


Figure 12. Microphotographies mettant en évidence le stade 1. (A)- Veine à pyrite (Py), arsénopyrite (Apy) et quartz 1 (Qz1) recoupant le schiste (LPA : lumière polarisée analysée) ; (B)- Pyrite-arsénopyrite à ciment de quartz 1 (LRN : lumière réfléchie) ; (C)- Inclusions d'arsénopyrite et de pyrrhotite (Po) au sein de la pyrite ; (D)- Sidérite (Sd) englobant l'arsénopyrite remaniée (LRN) ; (E)- Inclusions du bismuth natif (Bi) dans le quartz et association galène (Gn)-matildite (Mt) à la limite quartz-chalcopyrite ; (F)- Chalcopyrite (Ccp) et sphalérite (Sp) colmatant les microfissures de la pyrite (LRN).

Figure 12. Photomicrographs highlighting stage 1. (A)- Vein with pyrite (Py), arsenopyrite (Apy) and quartz (Qz), intersecting schist (LPA); (B)- Pyrite-arsenopyrite cemented by quartz 1 (LRN); (C)- Inclusions of arsenopyrite and pyrrhotite (Po) within pyrite; (D)- Siderite (Sd) including reworked arsenopyrite (LRN); (E)- Native bismuth (Bi) inclusions in quartz and galena (Gn)-matildite (Mt) association at the quartz-chalcopyrite limit; (F)- Chalcopyrite (Ccp) and sphalerite (Sp) sealing pyrite microfractures (LRN).

Les sulfosels, énumérés ci-dessous, s'observent principalement sous forme d'inclusions dans la galène :

- **Freibergite** (Fig. 14-A), titre en moyenne 30% d'argent (données MEB) et constitue la principale source de ce métal dans le gisement d'Amensif ;
- **Tétraédrite** ( $\text{Cu}_{7,34} \text{Fe}_{0,83} \text{Ag}_{3,08} \text{Zn}_{1,06} \text{Sb}_{3,63} \text{S}_{13,06}$ ), essentiellement associée à la galène, elle occupe, par endroit, des interstices entre les arsénopyrites (Fig. 14-B). Elle titre en moyenne 18% wt d'argent ;
- **Matildite** ( $\text{Ag}_{0,96-0,98} \text{Bi}_{1,01-1,02} \text{S}_{1,99-2,02}$ ), elle s'observe aussi dans la chalcoppyrite (Fig. 14-C). Sa teneur moyenne en Ag est de 26% wt ;
- **Schirmérite**, peu exprimée (Fig. 14-D), sa teneur en Ag est de l'ordre de 10% (données MEB).

Les sulfures d'altération sont principalement la bornite (relativement abondante dans le minerai bréchique), la covellite et l'azurite (Fig. 15-A, B).

## DISCUSSION

L'analyse statistique porte sur 7 variables (Pb, Zn, Cu, As, Fe, Ag et Au), en vue de caractériser les relations mutuelles entre les métaux précieux et les métaux de base, ainsi que leur expression minéralogique. A cette fin, l'analyse multivariée permet de dégager les regroupements recherchés, sachant que, dans notre cas, plus le nombre de variables est élevé plus l'analyse devient complexe et non concluante. Ainsi, nous avons procédé par les méthodes bivariée et multivariée.

La matrice de corrélation, met en évidence des coefficients de corrélation significatifs pour Ag-Cu ( $r = 0,72$ ) et Au-As ( $r = 0,58$ ), et ce en dépit du fait que l'analyse a porté sur la totalité des données brutes du cuivre et de l'arsenic.

L'analyse multidimensionnelle permet de distinguer 5 classes définies par le regroupement des individus ayant des teneurs élevées en variables particulières (Fig. 3) : Au, As pour la classe 4 (exemple échantillon AMCS 11-4) ; Cu et Ag pour la classe 3 (AMCS 16-10) ; Fe pour la classe 2 (AMCS1-2) ; Pb pour la classe 5 (AMCS 21-13) ; et Zn pour la classe

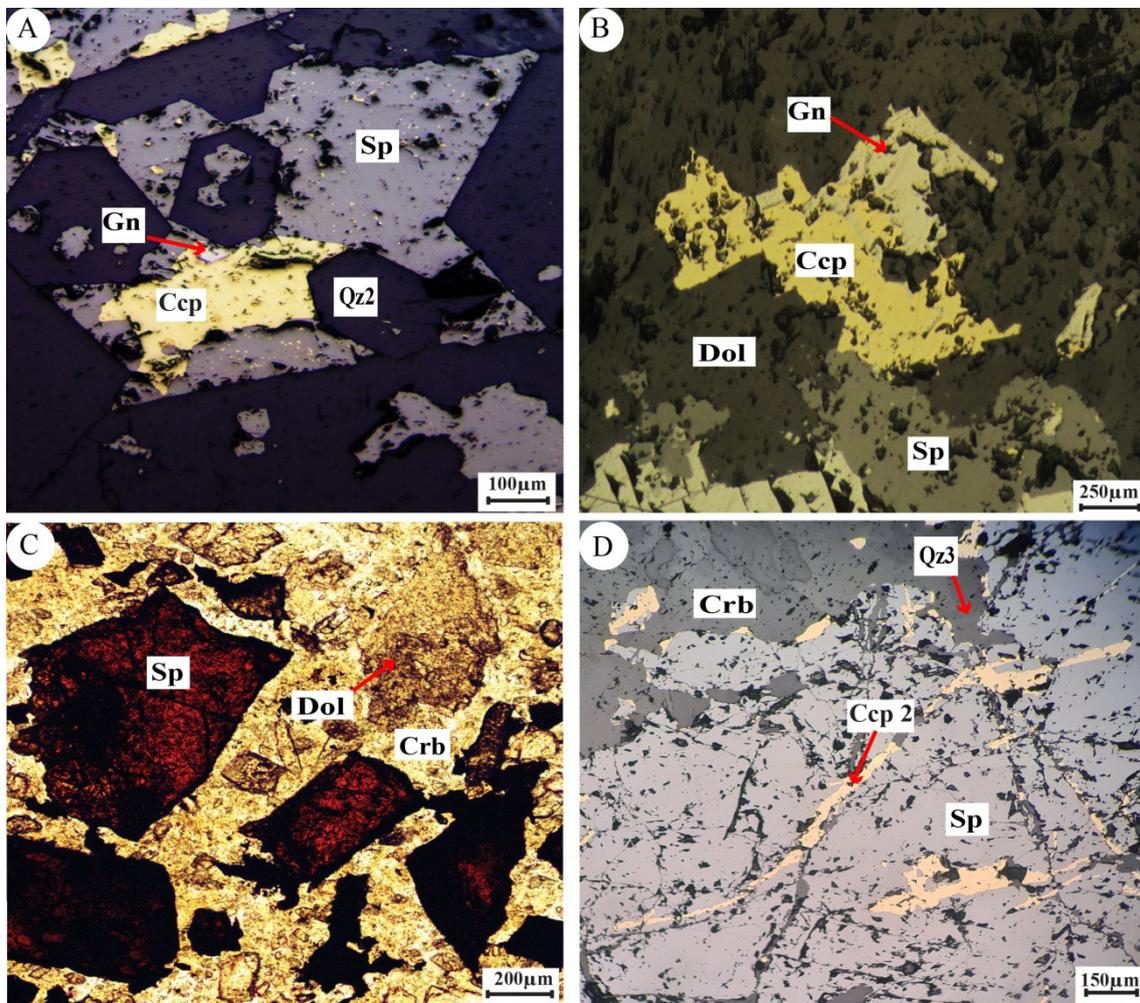


Figure 13. Microphotographies correspondant au stade 2 et au stade tardif. (A)- Quartz 2 automorphe enrobé par la chalcoppyrite et la sphalérite (LRN) ; (B)- Dolomite (Dol) englobant l'association galène, sphalérite, chalcoppyrite (LRN) ; (C)- Brèche à sphalérite et dolomite cimentées par des carbonates (Crb) du stade tardif (LPA) ; (D)- Chalcoppyrite de remobilisation en remplissage des microfissures de la sphalérite (LRN).

Figure 13. Photomicrographs corresponding to stage 2 and late stage. (A)- Automorphic quartz 2 coated by chalcopyrite and sphalerite (LRN); (B)- Dolomite (Dol) encompassing the association galena, sphalerite, chalcopyrite (LRN); (C)- Late-stage carbonate-cemented (Crb) sphalerite and dolomite breccia (LPA); (D)-Remobilization chalcopyrite filling sphalerite microfractures (LRN).

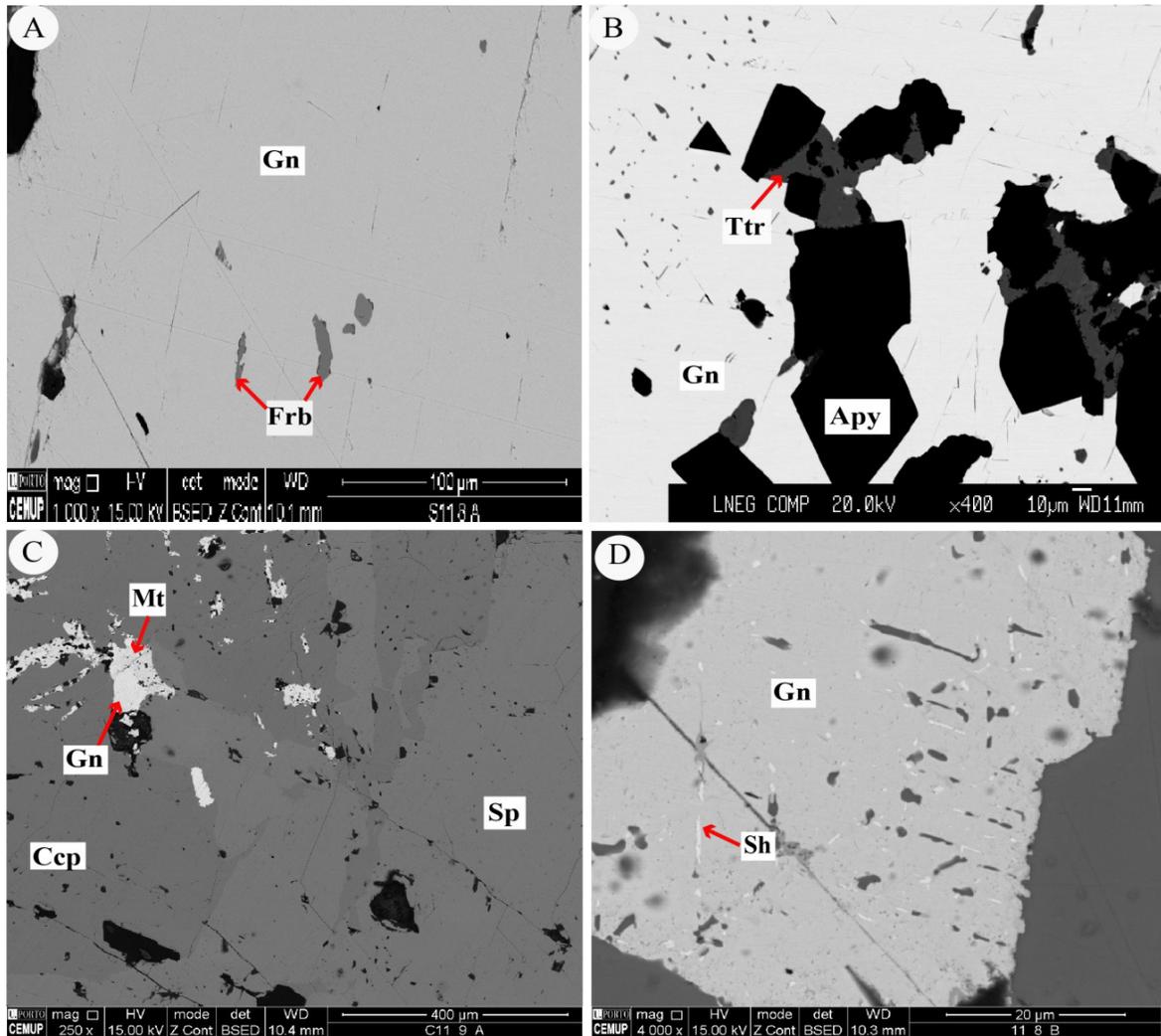


Figure 14. Microphotographies montrant les sulfosels argentifères associés à la galène. (A)- Inclusions de freibergite (Frb) dans la galène ; (B)- Association arsenopyrite, galène, et tétraédrite (Ttr) occupant l'espace entre les arsenopyrites ; (C)- Matildite associée à la galène post chalcopyrite et sphalérite ; (D)- Schirmérite (Sh) associée à la galène.

Figure 14. Photomicrographs showing silver sulfosalts associated with galena. (A)- Freibergite (Frb) inclusions in galena; (B)- Association of arsenopyrite, galena, and tetrahedrite (Ttr) occupying the space between the arsenopyrites; (C)- Matildite associated with galena post chalcopyrite and sphalerite; (D)- Schirmerite (Sh) associated with galena.

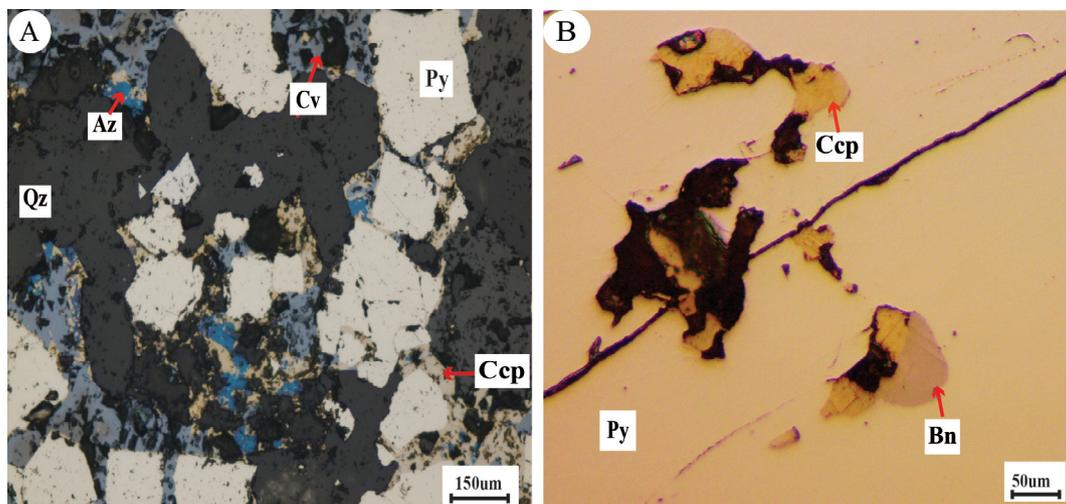


Figure 15. Microphotographies correspondant au stade supergène. (A)- Altération de la chalcopyrite en covellite (Cv) et azurite (Az) en association avec la pyrite et le quartz (LRN) ; (B)- Bornite (Br) en remplacement de la chalcopyrite (LRN).

Figure 15. Photomicrographs corresponding to the supergene stage. (A)- Alteration of chalcopyrite to covellite (Cv) and azurite (Az) in association with pyrite and quartz (LRN); (B)- Bornite (Br) replacing chalcopyrite (LRN).

6 (AMCS 24-3). Ces regroupements ont pour expressions minéralogiques, dans le même ordre, les phases suivantes : arsénopyrite aurifère, chalcopyrite et cuivre gris, pyrite et oxydes de fer, galène et sphalérite.

Les principaux minéraux hôtes de l'argent sont par ordre d'abondance relative: *freibergite*, *tétraédrite*, *matildite* et *schirmérite*. Concernant l'or, des échantillons prélevés dans les passes de carottes de sondages relativement riches en Au (jusqu'à 3 ppm) et composés principalement de pyrite et d'arsénopyrite ont fait l'objet d'un contrôle chimique par ICP et ont donné des teneurs de l'ordre de 4 ppm. Des lames minces confectionnées dans ces mêmes échantillons ont été analysées au MEB en vue de détecter de l'or dans ces deux minéraux ; les résultats n'ont pas été pertinents. Un contrôle à la microsonde électronique dans les conditions adéquates s'impose (vu que le programme <<sulfures>> utilisé à la microsonde de l'Université de Porto n'est pas approprié pour le dosage de l'or en faibles traces). Toutefois, Ilmen (2016) signale la présence de l'or sous forme d'amalgame Au-Ag en association avec la galène.

Les cartes de krigeage mettent en évidence, pour l'or comme pour l'argent, différentes anomalies à plus fortes teneurs (de l'ordre de 2 ppm pour Au et 300 ppm pour Ag). La zone A, située à l'extrême nord de la zone d'étude, se distingue par des concentrations notables de ces deux métaux (Figs. 7, 8). La distribution de l'argent se projette dans la continuité du filon nord orienté N15°E, alors que celle de l'or suit les structures N40°E. Cette distinction directionnelle, mais aussi paragenétique (Fig. 11), est en faveur de l'existence de deux événements minéralisateurs distincts : l'un globalement à pyrite et arsénopyrite aurifère ; l'autre à chalcopyrite, sphalérite, galène et sulfosels argentifères.

La distribution verticale, des plus fortes teneurs en Au ( $\geq 0,4$  ppm), Ag ( $\geq 30$  ppm) et As ( $\geq 0,4$  %) correspondant aux principales anomalies de krigeage (Fig. 16), montre une certaine continuité de la minéralisation en profondeur (au moins dans les limites atteintes par les sondages), ce qui laisse présager son extension plus en aval. L'or et l'arsenic montrent approximativement la même distribution (Fig. 16- A, B), sauf au niveau de la passe 80 à 150 m où les teneurs de l'arsenic sont faibles voire nulles, suggérant la présence éventuelle de l'electrum. Des teneurs exceptionnelles de l'or (2 à 4 ppm) sont notées, notamment au-delà de la côte 150 m (Fig. 16-B).

La modélisation 3D des différentes variables, montre deux lobes séparés par une discontinuité N150°E qui correspond à la zone de faille révélée par krigeage. La comparaison de la distribution de l'or et de l'arsenic montre une conformité spatiale (Fig. 10-A, B). Il en est de même pour l'argent vis-à-vis du cuivre notamment dans le lobe nord.

Les foyers de concentration tronqués par des plans de direction moyenne N150°E, attestent d'une tectonique cassante post-minéralisation. Ces foyers à gradients de concentrations décroissants vers l'extérieur correspondraient à des voies de circulation de fluides hydrothermaux minéralisateurs, riches en silice, imprégnant les roches encaissantes.

La présence d'une part des skarns dans la partie nord du gisement d'Amensif (Ilmen 2016) et d'autre part de nombreux dykes rhyolitiques (Fig. 2) plus la signature notable du bismuth natif plaident en faveur de l'existence d'une intrusion magmatique acide enfouie. En effet, non loin du gisement d'Amensif, un tel contexte s'observe à Azegour où le granite affleure et développe largement des skarns (Permingeat 1957). D'autres sites à skarns minéralisés (Tizgui, Tnirt,) sont également connus dans ce même district (Badra 1993, Zinbi 2003, 2006a-b).

Ainsi, les résultats combinés de la géostatistique, de la modélisation 3D et de la minéralogie pourraient constituer de bons guides pour orienter les travaux du développement minier dans le secteur d'Amensif. En effet:

- l'argent est à rechercher principalement en association avec la galène sous forme de cuivre gris (Freibergite, Matildite, Tétraédrite, Schirmérite) ;
- l'or est principalement lié à l'arsénopyrite et à la pyrite, et vraisemblablement à la galène (Ilmen 2016) ;
- les directions des structures cibles pour l'or et l'argent seraient respectivement N40°E et N15°E ;
- outre les structures minéralisées principales N15°E et N40°E, d'autres structures de direction N150°E, seraient à prendre en considération.

Il est à noter, par ailleurs, que le cuivre présente à l'échelle du secteur d'Amensif un fond géochimique non négligeable ( $>0.5\%$ ) avec localement des teneurs allant de 1,5 à 3% (Fig. 18). Une distribution de la sorte est traduite par une zone de concentration remarquable dans le lobe sud (Fig. 10-D).

Les résultats de ce travail, appuyés par la bibliographie régionale (Tab. 5), soulignent à l'échelle de la zone d'Azegour l'existence de deux types de gisements à métaux de base et métaux précieux : les skarns (Cu, As, Mo, Bi, Au,  $\pm$ Zn,  $\pm$ Pb) et les filons (Pb, Zn, Cu, Ag,  $\pm$ Sb,  $\pm$ Ba). Globalement, l'or est lié à l'arsénopyrite et/ou à la pyrite dans un contexte de skarns, tandis que l'argent est lié directement ou indirectement à la galène filonienne. Dans cette zone, on note dans certains sites une association de type skarn/filon (exemple : Tnirt, Badra 1993; Amensif, Ilmen 2016 et Jinari *et al.* 2023). Une telle association régionale n'exclurait pas l'hypothèse d'un éventuel télescope géologique de type skarn/filon dans cette zone.

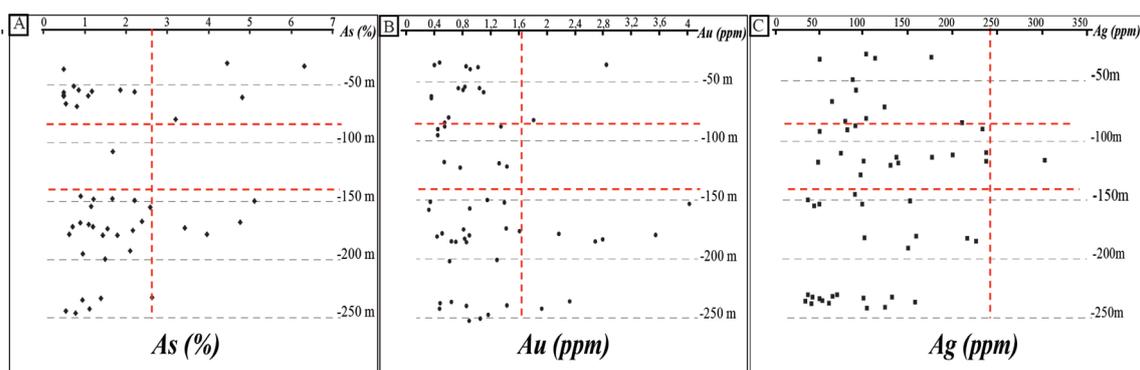


Figure 16. Graphiques comparatifs de la distribution verticale des plus fortes teneurs en As, Au et Ag.  
 Figure 16: Comparative graphs of the vertical distribution of the highest contents of As, Au and Ag.

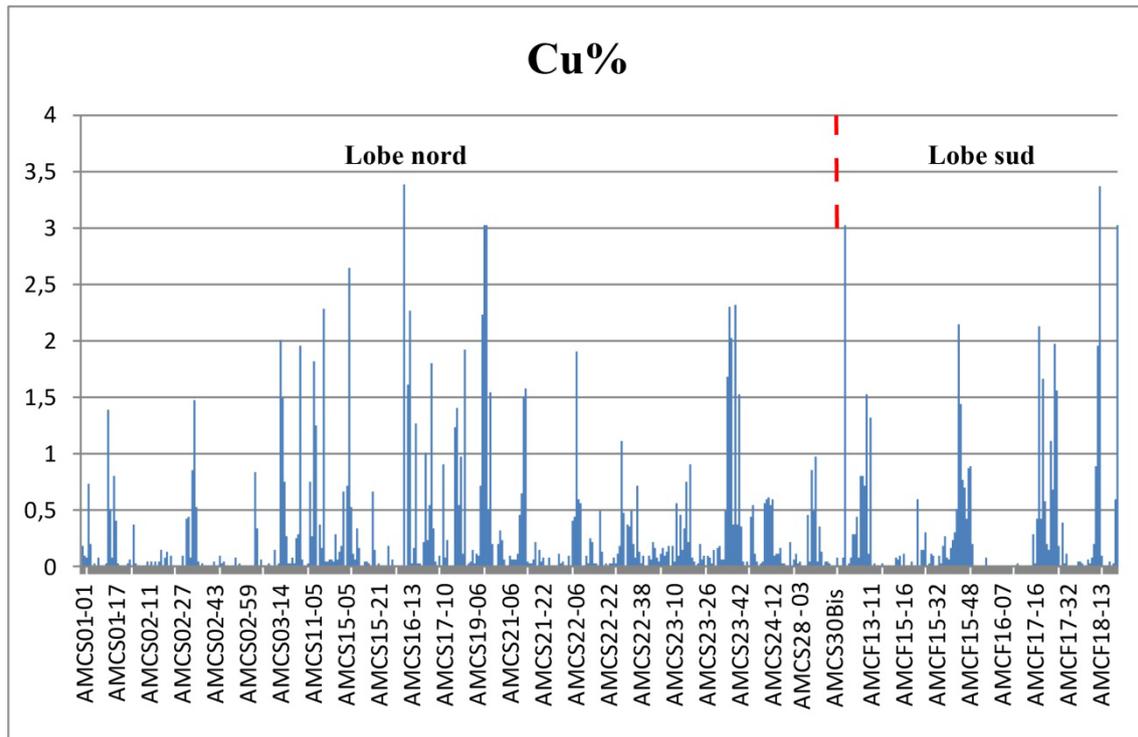


Figure 17. Histogramme du cuivre dans les lobes nord et sud du secteur d'étude.  
 Figure 17. Histogram of copper in the north and south lobes of the study area.

Tableau 5. Tableau comparatif des principales caractéristiques des gisements et gîtes à métaux de base et métaux précieux dans la zone d'Azegour.

Tableau 5. Comparative table of the main characteristics of the deposits of base metals and precious metals in the Azegour area.

Gisements et gîtes	Type de minéralisation	Principaux éléments	Références
<b>Azegour</b>	Skarns	(Mo, W, Cu, (Pb, Zn, Ag	Permingeat 1957, El Amrani 1984, Amenzou & Badra 1996, Berrada <i>et al.</i> 2011, 2015, El Khalile <i>et al.</i> 2014, Marcoux <i>et al.</i> 2019, Marcoux & Jébrak 2021
<b>Tizgui</b>		(As, Au, (Pb, Zn, Ag	Zinbi 2003, 2006
<b>Tighardine</b>	Carbonate-replacement deposit	Pb, Zn, Cu, Ag	Alansari <i>et al.</i> 2009 Boukerrou <i>et al.</i> 2018
<b>Amensif</b>	Skarn distal Filon	As, Au Cu, Pb, Zn, Ag	Jinari <i>et al.</i> 2023 Ilmen 2016
<b>Erdouz</b>	Filon	Zn, Pb, Ag	Badra 1993, Badra <i>et al.</i> 1992
<b>Tnirt</b>	Filon Skarn	Pb, Zn, Cu, As, Au, Ba	Badra 1993

## CONCLUSION

L'étude statistique et la modélisation 3D, soulignent des corrélations significatives de type Au-As et Ag-Cu. En effet, l'évolution paragenétique de la minéralisation d'Amensif se caractérise principalement par deux stades à métaux précieux: le premier où l'or serait principalement lié à l'arsénoopyrite et à la pyrite, l'ensemble est associé à une gangue de quartz; le second stade à gangue carbonatée, chalcopyrite, sphalérite et galène où l'argent est lié aux sulfosels inclus dans la galène. Les résultats de l'étude minéralogique confirment les déductions de l'analyse statistique. Les principales directions

de distribution déduites par krigeage sont N15°E pour l'argent et N40°E pour l'or. L'activité hydrothermale à l'origine d'une telle minéralisation serait en rapport avec une éventuelle intrusion acide enfouie.

En termes de développement minier, compte tenu de la signature géochimique des métaux précieux connus à Amensif, Tnirt, Tizgui et Talat N'Imjjad, la zone d'Azegour s'avère constituer une cible prometteuse pour la recherche minière de l'or et de l'argent en association avec les métaux de base.

## REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement le Professeur Abdelkhalek ALANSARI (Université Cadi Ayyad, Marrakech) et le Professeur Hermann ILBOUDO (Université Joseph KIZERB, Burkina Faso) en leur qualité d'évaluateurs pour leurs conseils et leurs remarques pertinentes ainsi que le Professeur Hamid Slimani en tant qu'éditeur.

Nous remercions également la société Managem pour avoir mis notre disposition les données chimiques et les échantillons.

Nous tenons à remercier Dr. Rachid El Bayad (Directeur de Isis Technology), ainsi que Mr. Sadgui Nour-eddin (cadre géologue de la société Managem) pour leur contribution 3D.

## RÉFÉRENCES

- Ait Ayad N. 1987. *Etude des relations entre déformation et intrusion granitique (l'exemple du granite hercynien d'Azegour)*. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université Cadi Ayyad, Maroc, 145p.
- Alansari A., Bajddi A. & Zouhair M. 2009. Mise en évidence d'une évolution verticale dans la minéralogie et la typologie des minéralisations à Cu-Zn-Pb-Ag-Ba de Tighardine : Apport à l'exploration minière dans le Haut Atlas Occidental (Maroc). *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, 530, 31–44.
- Amenzou M. & Badra L. 1996. Les granites d'Azegour et de Brikine (Maroc) : implication génétique d'après la typologie des zircons. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 323, 213–220.
- Badra L. 1993. *Les minéralisations polymétalliques (Pb-Zn-Cu, Ba) du Haut-Atlas occidental marocain et de ses confins dans leur cadre géodynamique*. Thèse d'Etat, Université d'Orléans, France, 415p.
- Badra L., Prost A.E. & Touray J.C. 1992. Chronologie relative des minéralisations Zn-Pb de la région de l'Erdouz (district d'Azegour) et des phases de déformation hercyniennes dans le Haut-Atlas occidental plissé (Maroc). *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2, Sciences de la Terre*, 313(3), 331–337.
- Berrada S., Marcoux É. & Hafid A. 2015. Le skarn à W-Mo-Cu à grenatite, pyroxénite, wollastonite et molybdénite d'Azegour, Haut-Atlas, Maroc. *Bulletin de la Société géologique de France*, 186, 21–34.
- Berrada S., Hajjaji M. & Belkabar A. 2011. Mineralogical and geochemical features of the wollastonite deposit of Azegour, High Atlas (Morocco). *Journal of African Earth Sciences*, 60, 247–252.
- Boukerrou S., Nalini H., Moreira H. *et al.* 2018. Geochronology and geochemistry of Ediacaran volcanic rocks of the Tighardine ore deposit formation (western High Atlas, Morocco). *Arabian Journal of Geosciences*, 11(2), 1–24.
- Cornée J.J., Destombes J. & Willefer S. 1987a. Stratigraphie du Paléozoïque de l'extrémité nord-ouest du Haut-Atlas occidental (Maroc hercynien) ; interprétation du cadre sédimentaire du Maroc occidental. *Bulletin de la Société géologique de France*, s. III, 8, 327–335.
- Cornée J.J., Ferrandini J., Muller J. *et al.* 1987b. Le Haut Atlas occidental paléozoïque : un graben cambrien moyen entre deux décrochements dextres N60°E, hercyniens (Maroc). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, 305, 499–503.
- Dias R., Hadani M., Machado L.I. *et al.* 2011. Variscan structural evolution of the western High Atlas and the Haouz plain (Morocco). *Journal of African Earth Sciences*, 39, 311–318.
- El Archi A., Jouhari A. & Bouabdelli M. 2003. Les formations du Massif ancien du Haut Atlas marocain (Protérozoïque terminal probable et Paléozoïque inférieur) : un jalon entre l'Anti Atlas et les domaines septentrionaux de la Meseta marocaine. *Africa geoscience review*, 10(4), 389–398.
- El Amrani E.I. 1984. *Contribution à l'étude pétrologique, minéralogique, métallogénique et de pétrologie structurale des formations de la région d'Azegour (Haut-Atlas occidental, Maroc)*. Thèse Doctorat 3<sup>ème</sup> cycle. Faculté des Sciences, Nancy I. France, 228p.
- El khalile A., Touil A., Hibti M. *et al.* 2014. Metasomatic zoning, mineralizations and genesis of Cu, Zn and Mo Azegour skarns (western High Atlas, Morocco). *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 9(1), 21–32.
- Fekkak A., Ettachfini E.M., Ouanaim H. *et al.* 2018. Notice explicative de la carte géologique du Maroc au 1/50 000 feuille Azegour. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, 396, 142.
- Fontailles M. & Garcia D. 1985. Le grenat mixte grossulaire-almandin (spessartine) comme indicateur d'une source magmatique proche dans les gîtes de skarns à tungstène. *Comptes rendus de l'Académie des sciences, Série 2, Sciences de la Terre*, 300, 807–810.
- Ilmen S., Baidada B., Hajjar Z. *et al.* 2022. The Ait Dawd Cu-Ni vein deposit : new mineralogical insights to understand the mineralizing criteria of the western High Atlas district (Morocco). *Arabian Journal of Geosciences*, 15(20), 1–18.
- Ilmen S. 2016. *Contribution à l'Etude des Minéralisations à Zn-Pb-Cu-Au-Ag dans le Haut Atlas occidental : Cas du gisement à Zn-Pb-Cu-(Au-Ag) d'Amensif et du gisement à Cu-Au-(Bi) de Talat n'Imjjad (Région d'Amizmiz, Maroc)*. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université Cadi Ayyad, Maroc, 272p.
- Ilmen S., Alansari A., Bajddi A. *et al.* 2015. Cu–Au vein mineralization related to the Talat n'Imjjad shear zone (western High Atlas, Morocco) : geological setting, ore mineralogy, and geochemical evolution. *Arabian Journal of Geosciences*, 8, 5039–5056.
- Ilmen S., Alansari A., Bajddi A. *et al.* 2014. Contribution à l'étude géologique du gisement à Cu, Zn, Pb et Ag-Au d'Amensif (District minier d'Amizmiz, Haut Atlas occidental, Maroc). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 6(4), 768–783.
- Jinari A., Rddad L., Mouguina E. *et al.* 2023. Origin of the Amensif Zn-Cu (Pb-Ag-Au) distal skarn deposit (Western High Atlas, Morocco): Constraints from C-O-S isotopes. *Journal of African Earth Sciences*, 199, 104850.
- Johnston K., Ver Hoef J.M., Krivoruchko K. *et al.* 2001. Using ArcGIS geostatistical analyst. *Redlands: Esri*, 380, 306p.
- Labriki M. 1996. Carte géologique du Maroc, feuille d'Amizmiz au 1/100 000. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, 372p.
- Marcoux É. & Jébrak M. 2021. Plombotectonique des gisements du Maroc. *Bulletin de la Société géologique de France*, 192(1), 31.
- Marcoux É., Breillat N., Guerrot C. *et al.* 2019. Multi-isotopic tracing (Mo, S, Pb, Re-Os) and genesis of the Mo-W Azegour skarn deposit (High-Atlas, Morocco). *Journal of African Earth Sciences*, 155, 109–117.

- Mrini Z., Rafi A., Duthou J. L. *et al.* 1992. Chronologie Rb-Sr des granitoïdes hercyniens du Maroc ; conséquences. *Bulletin de la Société géologique de France*, 163(3), 281–291.
- Ouanaimi H. & Petit J.P. 1992. La limite sud de la chaîne hercynienne dans le Haut Atlas marocain : reconstitution d'un saillant non déformé. *Bulletin de la Société géologique de France*, 163, 63–72.
- Ouazzani H., Pouclet A., Badra L. *et al.* 2001. Le volcanisme d'arc du massif ancien de l'ouest du Haut-Atlas occidental (Maroc), un témoin de la convergence de la branche occidentale de l'océan panafricain. *Bulletin de la Société géologique de France*, 172(5), 587–602.
- Permingeat F. 1957. Le gisement de molybdène, tungstène et cuivre d'Azegour (Haut Atlas). Etude pétrographique et métallogénique. *Notes et Mémoires du Service géologique du Maroc*, 141, 284p.
- Prost A., Badra L. & El Hasnaoui H. 1989. Superposition de trois déformations ductiles hercyniennes dans le Haut Atlas (région d'Azegour-Erdouz, Maroc). *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 309, 627–632.
- Zinbi Y. 2006a. Travaux d'exploration réalisés dans les Permis de Recherche minière de la Société SEGM (Haut Atlas Occidental, Maroc), inédit.
- Zinbi Y. 2006b. Travaux réalisés sous forme de tranchées dans la colline T, Az10 J et la Zone Az-S, inédit.
- Zinbi Y. 2003. Etude Géologique et Minéralogique des Minéralisations Aurifères Type Carlin dans les calcaires datés Cambrien du Haut-Atlas Occidental (Région de Tizguine-Amizmiz, Maroc), SEGM, inédit.

Manuscrit reçu le 15/11/2022  
Version révisée acceptée le 22/12/2023  
Version finale reçue le 23/12/2023  
Mise en ligne le 25/12/2023