

Apport de la modélisation géologique 3D à l'exploration minière: Etude de cas du gisement de Draa Sfar (Jbilets centrales, Maroc)

[Mining exploration using 3D geological modeling: Draa Sfar deposit's case study (Central Jbilets, Morocco)]

Laila SALAMA¹⁻², El Mostafa MOUGUINA², Abderrazak NAHID³, Essaid EL BACHARI⁴, Mohamed OUTHOUNJITE¹, Mohamed ESSAOUDI¹, Lhou MAACHA¹, Mohamed ZOUHAIR¹, and Aomar EN NACIRI¹

¹Service Géologie, Compagnie Minière de Guemassa, Marrakech, Maroc

²Laboratoire Dynamique de la Lithosphère et Genèse de Ressources Minérales et Energétiques (DLGR), Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Maroc

³Laboratoire GeoHyd. Département de Géologie, Faculté des Sciences Semlalia UCA, Marrakech, Maroc

⁴Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes d'information (LISI), Faculté des Sciences Semlalia UCA, Marrakech, Maroc

Copyright © 2016 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: The Draa Sfar mine is one of the important deposits in the western Meseta of Morocco (10Mt @ 5% Zn, 2% Pb, 0.33% Cu). This deposit is the Volcanogenic Massive Sulphide type (VMS). It's located on the southern edge of the Hercynian Central Jebilets Massif. The mineralization is hosting in the Upper Viséan-Namurian age and associated with rhyodacitic rocks.

To understand the spatial distribution of basic metals and the zoning of hydrothermal alteration, on the scale of the deposit, we used two 2D-3D modeling software; Vulcan and Surfer. The software Vulcan showed us the flat shape of the mineralized megalens which is continuous and more or less distorted. In the northern part of the deposit, the mineralized lenses appeared superimposed level with the distinction of roof and wall formations. Vulcan also showed a southern block Zn-Pb-rich, a northern block Cu-Co (Au)-rich, and a center block which is the intermediate zone.

Moreover, the software Surfer established longitudinal and cross sections of the same values, the same power and the same cut off grade of the major elements. He has shown the high deep power areas in the southern block and characteristics of hydrothermal alteration zones.

The results of modeling obtained by Vulcan and Surfer are a contribution to the exploitation of the Draa Sfar mine while ensuring its development and sustainability of its activity. They could also constitute guides for the exploration of similar deposits in the Jebilets-Guemassa metallogenic province.

KEYWORDS: Modeling; Vulcan; Surfer; spatial distribution; hydrothermal alterations; volcanogenic massive sulphide; Draa Sfar; Central Jebilet; Morocco

RESUME: La mine Draa Sfar compte parmi les gisements les plus importants de la meseta occidentale marocaine (10Mt @ 5% Zn ; 2% Pb ; 0,33% Cu). Ce gisement est localisé sur la bordure sud du massif hercynien des Jebilets Centrales. La minéralisation, associée à des roches rhyodacitiques, est de type amas sulfuré volcanogène (ASV), dans un encaissant d'âge Viséen supérieur-Namurien.

Pour comprendre la distribution spatiale des métaux de base et la zonalité des altérations hydrothermales à l'échelle du gisement, nous avons utilisé deux logiciels de modélisation 2D-3D ; Vulcan et Surfer. Le logiciel Vulcan nous a montré la forme aplatie, continue et plus au moins déformée des mégalentes minéralisées. Dans la partie Nord de ce gisement, les lentilles minéralisées apparaissent superposées en échelon avec la distinction des formations du toit et du mur. Vulcan a montré aussi un bloc sud riche en Zn-Pb, un bloc nord riche en Cu-Co (Au), et un bloc centre qui constitue la zone intermédiaire.

Par ailleurs, le logiciel Surfer a établi les coupes longitudinales et transversales des isovaleurs, des isopuissances et des isoteneurs des éléments majeurs. Il a ainsi montré les zones à forte puissance dans les profondeurs du bloc sud et la caractérisation des zones d'altérations hydrothermales.

Les résultats de modélisation obtenus par Vulcan et Surfer, constituent un apport à l'exploitation de la mine Draa Sfar tout en assurant son développement et la pérennité de son activité. Ils pourraient aussi constituer des métallogènes pour l'exploration de gisements similaires dans la province métallogénique des Jebilet Guemassa.

MOTS-CLEFS: Amas sulfuré volcanogène ; modélisation ; Vulcan ; Surfer ; distribution spatiale ; altérations hydrothermales, Draa Sfar, Jebilet Centrales ; Maroc.

1 INTRODUCTION

La mine de Draa Sfar (DS) est l'un des principaux gisements à métaux de base du Maroc avec un tonnage qui dépasse 10Mt. C'est un gisement polymétallique de type amas sulfuré volcanogène à zinc, plomb et cuivre qui appartient au massif hercynien des Jebilet Centrales. Sa découverte en 1953 a été confirmée en 1962 par une anomalie magnétique au sol [1]. Au cours de son développement, ce gisement a fourni une grande quantité d'informations géologiques, minéralogiques, géochimiques, géophysiques et de travaux miniers. Le suivi quotidien de ces travaux et l'interprétation continue de ces données a permis à l'équipe du service géologique de la mine de répondre à la problématique de la planification de la production et l'implantation des sondages.

Pour un meilleur rendement économique de ce gisement, l'utilisation de l'outil informatique, comme Vulcan 3D et Surfer, s'avère nécessaire et importante. Ces logiciels permettent d'exploiter, d'archiver et de capitaliser les données de sondages obtenues sur le terrain ainsi que leurs traitements géostatistique. Ils aident à visualiser le gisement en 3D et à estimer les potentiels miniers comme il a été utilisé lors de la modélisation des environnements des sulfures massifs du nord-ouest de la sous-province de l'Abitibi au Canada [2]. Les résultats obtenus de l'utilisation de ces logiciels dans le gisement de DS seront présentés et discutés dans ce travail.

2 CONTEXTE GÉNÉRAL : CADRE GÉOLOGIQUE DES JEBILETS CENTRALES

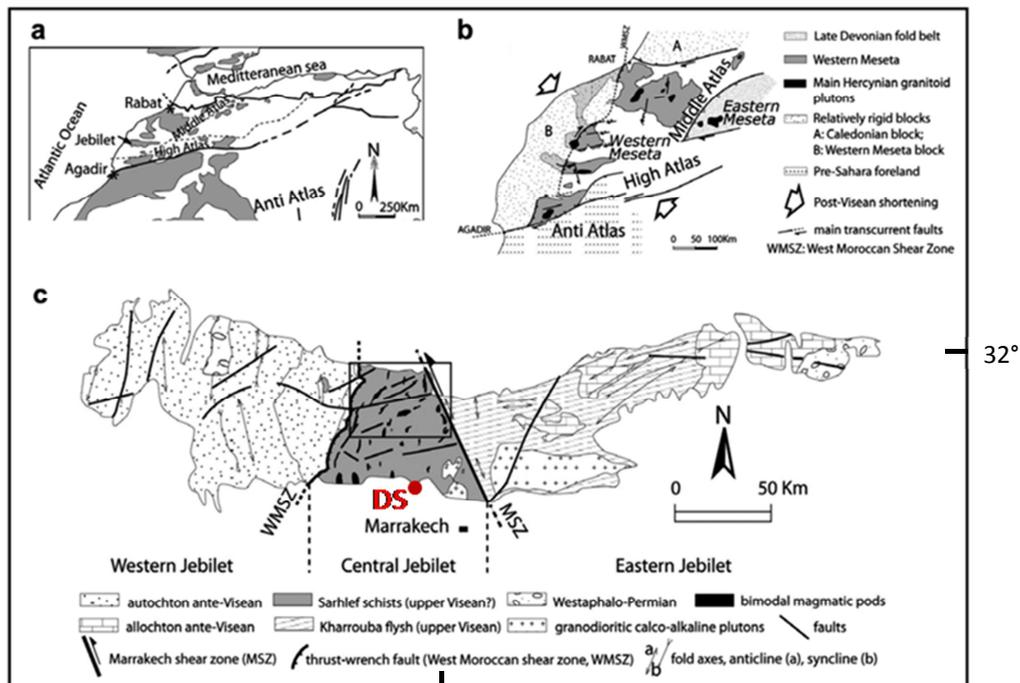
Le domaine des Jebilet Centrales [1], de direction générale Est-ouest, s'étend sur une longueur qui atteint 170 Km et une largeur qui varie entre 7 à 40 Km (fig.1), depuis la plaine de la Bahira au Nord jusqu'à la plaine de Haouz au Sud. Il est limité à l'Est par les montagnes de l'Atlas de Béni Mellal et à l'Ouest par les collines du Jurassico-Crétacé des Mouissat. A travers ce domaine, nous observons de petits pointements du socle paléozoïque orientés NS à NNE-SSW au sein d'une couverture miopliocène et quaternaire.

Le massif des Jebilet est marqué par la juxtaposition de trois unités d'orientation méridienne, reposant sur des terrains précambriens anciens [3]. Ce sont de l'Est à l'Ouest : Un ensemble oriental, ou flysch de Kharrouba, constitué de métasédiments datés du Viséen supérieur. Il est caractérisé par la présence d'olistostromes et de séries ordovico-dévonienues [1] mises en place par des glissements gravitaires dans le bassin Viséen pendant les phases précoces de l'orogénèse hercynienne [1],[4],[5]; un ensemble central, ou schistes de Sarhlef, formé essentiellement par une série volcanosédimentaire à minéralisation sulfurée et dont les terrains sont également d'âge Viséen supérieur-namurien [1]. Ils sont déformés et métamorphisés dans des conditions anchi à épizonales [1], [6], [7]. Cet ensemble est caractérisé par la mise en place de corps intrusifs acides et basiques ainsi que des magmas granitiques [4], [8], [9], [10], et un ensemble occidental, dit de Bou Gader, essentiellement formé de séries cambro-ordoviciennes [1], [11] faiblement plissées de direction subméridienne et peu ou pas métamorphisées.

La série carbonifère de Sarhlef est affectée par une intense déformation hercynienne et post hercynienne. Elle est d'abord affectée par une phase de plissement synschisteuse subméridienne, associée à un métamorphisme épizonal d'âge post-Viséen supérieur [11]. Cette phase est suivie par des cisaillements subparallèles à la schistosité de flux (S1), eux-mêmes

repris par un plissement associé à une schistosité de crénulation (S2) avec parfois une transposition des phyllites de la schistosité S1.

A ce métamorphisme général est associé un métamorphisme péri-plutonique qui se développe autour des intrusions granitiques avec des auréoles en phénoblastes. Enfin, la tectonique cassante qui se matérialise essentiellement par des failles de direction N70 à N90 ; des décrochements senestres N160 et de grandes failles subméridiennes associées aux fossés stephano-permiens [12].



8

Fig. 1. a- Carte de localisation géographique, b- carte des terrains paléozoïques au Maroc et c- cadre géologique simplifiée des Jebilettes montrant la situation du gisement de Draa Sfar (DS) [18]

3 CADRE GÉOLOGIQUE ET GITOLOGIQUE

Le gisement de Draa Sfar (DS) est situé sur la marge sud des Jebilettes centrales à 16 Km au NW de Marrakech (fig. 1). Il est subdivisé en trois blocs (fig. 5). Cette subdivision est une conséquence du découpage du corps minéralisé lors de l'exploitation du gisement de DS :

- Le bloc nord (BN) au niveau du Draa Sfar Nord;
- Le bloc centre (BC) au niveau du Draa Sfar Centre et;
- Le bloc sud (BS) au niveau du Draa Sfar Sud

Ces blocs se localisent respectivement sur la rive nord et la rive sud de l'oued Tensift. Le BN est représenté par un pointement du socle hercynien avec une dimension modeste (300m/100m). Celui-ci, orienté NS, est caractérisé par l'affleurement d'un chapeau de fer matérialisé par des zones altérées. Par ailleurs, le BS et le BC, qui constitue le prolongement de ce dernier, apparaissent au Sud de l'Oued Tensift, sous forme d'un pointement plus grand que le précédent avec une extension d'environ 1.2Km et une largeur de 700m environnant. Ce pointement émerge dans la couverture Miopliocène et Quaternaire.

Le corps minéralisé se présente sous forme de lentilles sulfurées encaissées entre une série de base de nature soit volcanique et ou rhyodacitique et volcanosédimentaire à faciès tuffacés intercalés de niveaux détritiques pyroclastiques ; et une série de toit de nature détritique à pélites fines et à matrice carbonatée.

La mise en place et la morphologie du corps minéralisé sont conditionnées par les effets de différentes phases de l'orogénèse hercynienne dont la reconstitution a permis de dégager quatre stades successifs [1] depuis la phase

Synsédimentaire liée à la mise en place du dôme rhyodactique ainsi que le dépôt des sulfures, en passant par les phases synschisteuses ductiles responsables, entre autre, du renversement du corps minéralisé et son encaissant à la verticale avec déversement vers l'Ouest, jusqu'à la phase cassante responsable de la dislocation du corps minéralisé et le changement de sa direction.

[13] a souligné que les faciès du mur sont poreux puisqu'ils présentent des structures à forte perméabilité et donc, leur rôle important dans la circulation des fluides minéralisés responsables de la formation des lentilles à Pyrrhotite de DS. Il a conclu également que la mise en place de la minéralisation s'est effectuée par des phénomènes de remplacement des roches pyroclastiques, en plus des phénomènes exhalatifs à partir des fluides hydrothermaux débouchant sur un fond marin peu profond.

4 MÉTHODOLOGIE DE TRAVAIL

Les étapes d'exploration et d'exploitation de la mine DS ont généré une quantité importante d'informations sur ce gisement. Ceci a permis la constitution d'une base de données qui a été utilisée dans les modélisations présentées dans ce travail (tab. 1). Ces derniers ont nécessité l'utilisation de deux logiciels, à savoir Vulcan et Surfer. Le logiciel Vulcan a permis d'accéder et de consulter les données de sondages, de modéliser avec précision et de visualiser les corps minéralisés et l'infrastructure minière. De plus, il a permis d'estimer les ressources et les réserves et d'avoir un tableau de bord de la planification et la programmation des activités minières. Quant au logiciel Surfer, il nous a permis de créer des modèles numériques de terrains (MNT) ; ceci à partir des données récoltées sur le terrain via GPS.

Tableau 1 : Données du gisement de Draa Sfar, utilisées dans les modélisations de ce travail

Données en nombres	Bloc Sud	Bloc Central	Bloc Nord	Total
Sondages carottés Jour	67	35	77	179
Sondages carottés Fond	187	9	-	196
Coupes transversales	14	9	12	35
Plans de Niveau	45	32	32	109
Echantillons analysés	10153	565	1162	11880
Sondages carottés jour utilisés en géochimie	3	2	4	9
Sondages carottés fond utilisés en géochimie	7	3	4	14

5 RÉSULTATS

Le traitement des données soulignées au tableau 1, par les logiciels Vulcan et Surfer, a permis d'aboutir à divers résultats relatifs à la modélisation 3D du corps minéralisé et son encaissant. Ainsi, cette modélisation a montré la distribution spatiale des métaux de base, les zonalités des éléments majeurs et les puissances des éléments géologiques étudiés.

5.1 MODÉLISATION LITHOLOGIQUE 3D

Le corps minéralisé de DS est encaissé dans une série volcanosédimentaire (fig. 2 et fig. 5) caractérisée par la présence successive, du mur au toit, des faciès suivants:

- Les laves volcaniques qui affleurent sous forme d'un dôme dans la partie sud du gisement de DS. Notons, que ces laves volcaniques rhyodacitiques et dacitiques s'éloignent de la minéralisation progressivement vers l'aval (fig. 3a).
- Les tufs qui se trouvent souvent en contact direct avec la minéralisation. Il s'agit d'une série continue avec une épaisseur moyenne de 30m (fig. 3b).
- Les pélites gréseuses en plusieurs bandes continues ou discontinues caractérisant le côté Est du corps minéralisé, entre les tufs et les laves ou à l'Est des laves, avec une épaisseur variable entre 20 à 160 m (fig. 3c).

- Les pélites carbonatées du toit constituant la suite sommitale de la série volcanosédimentaire du gisement de DS. Elles reposent en contact, parfois faillé, sur le corps minéralisé. C'est une série continue d'une puissance de 137m qui augmente vers l'aval du corps minéralisé en atteignant 290 m (fig. 3d).

Au microscope, ces faciès montrent les aspects suivants (fig. 4):

- a) Les laves rhyodacitiques avec des grains de quartz globuleux entouré par des plagioclases moulés par les phyllites de la matrice. Ces plagioclases sont albitisés et transformés en séricite [14] (fig. 4a).
- b) Les bancs de tuf avec des plagioclases sous forme de débris en prisme, des grains de quartz et de la séricite fine qui remplit les interstices des cristaux [14] (fig. 4b).
- c) Les pélites noires carbonatées sont formés par des grains de quartz arrondis, des intra-clastes, des oxydes et des cristaux de séricite (fig. 4c).
- d) Les pélites gréseuses schistosées montrent des grains de quartz (80%) dans une mésostase chloritisée avec présence des oxydes et du mica allongé dans l'espace intercrystallin (fig. 4d).

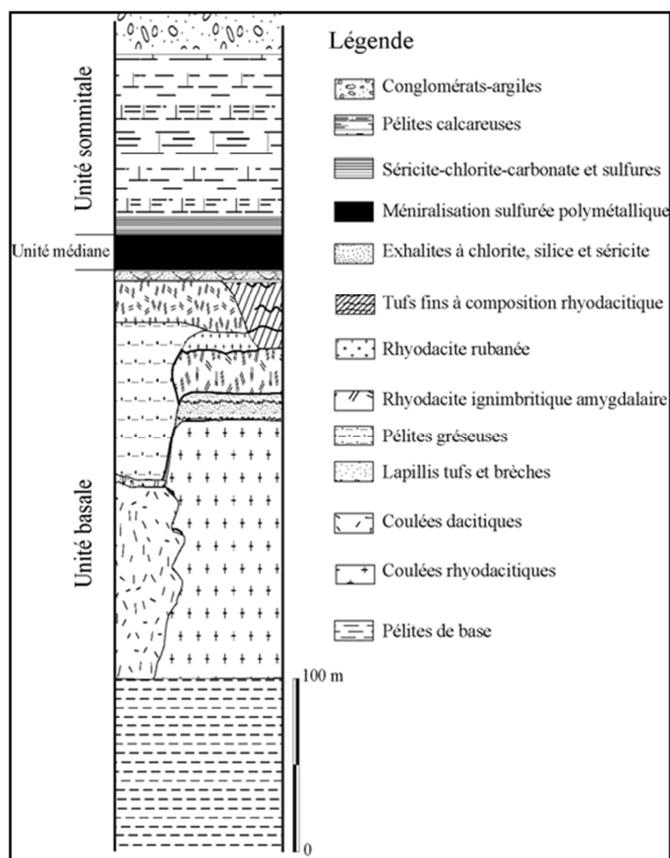


Fig.2. Log lithostratigraphique représentatif du gisement de Draa Sfar [13]



Fig. 3. Aspects macroscopiques des faciès du gisement de Draa Sfar : a) Laves rhyodacitiques ; b) Banc de tuf à quartz (Qtz) et feldspath (Feld) ; c) Pélites gréseuses schistosées; d) Pélites noires carbonatées.

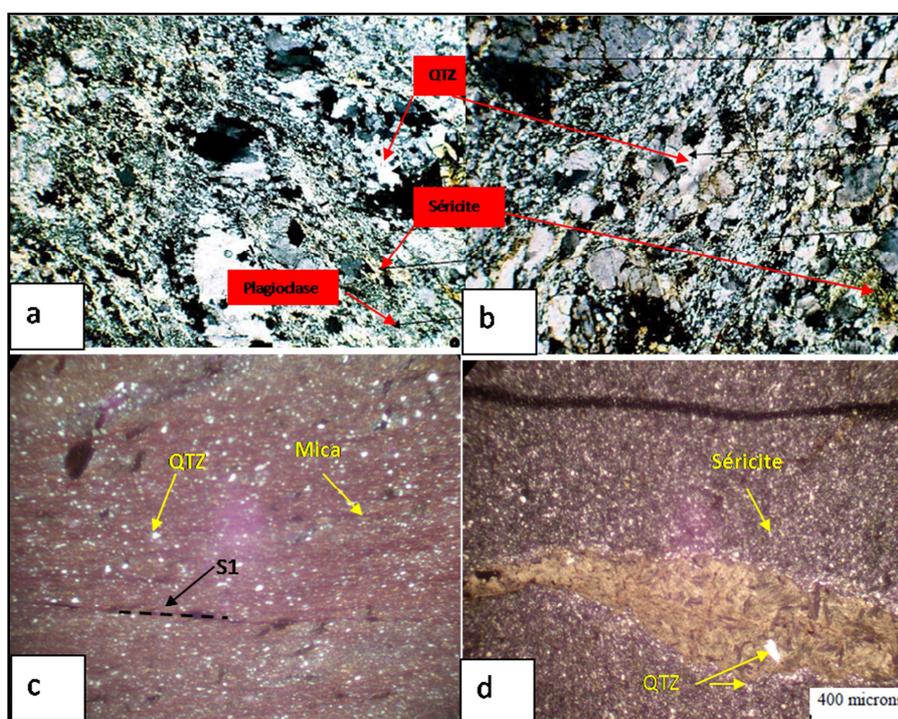


Fig. 4. Aspects microscopiques des différents faciès du gisements de Draa Sfar

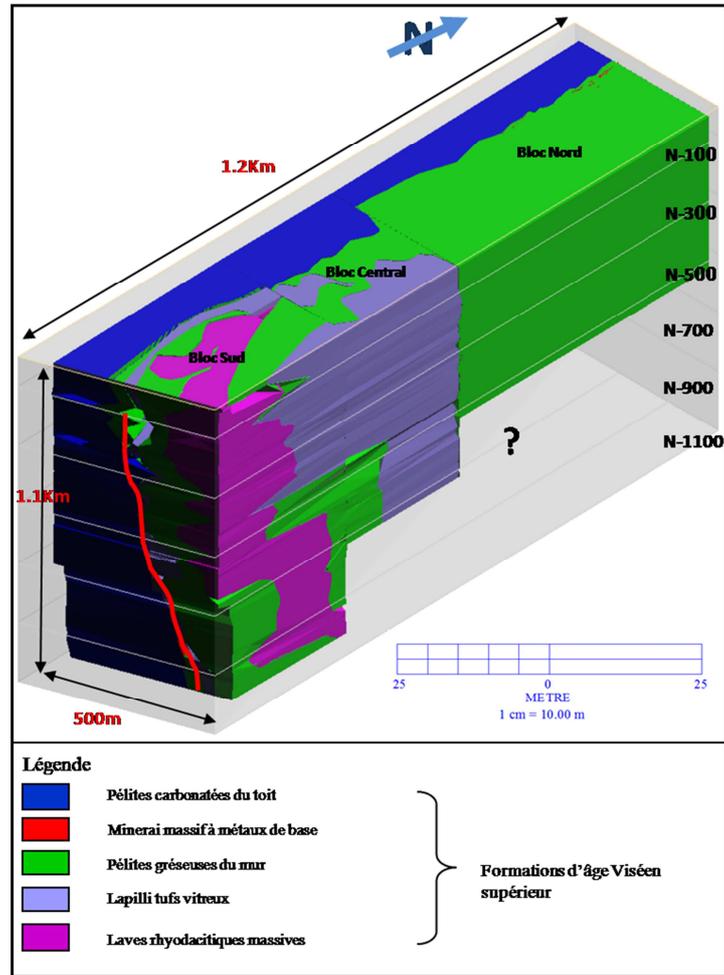


Fig. 5. Représentation en bloc diagramme en 3D du gisement de Draa Sfar

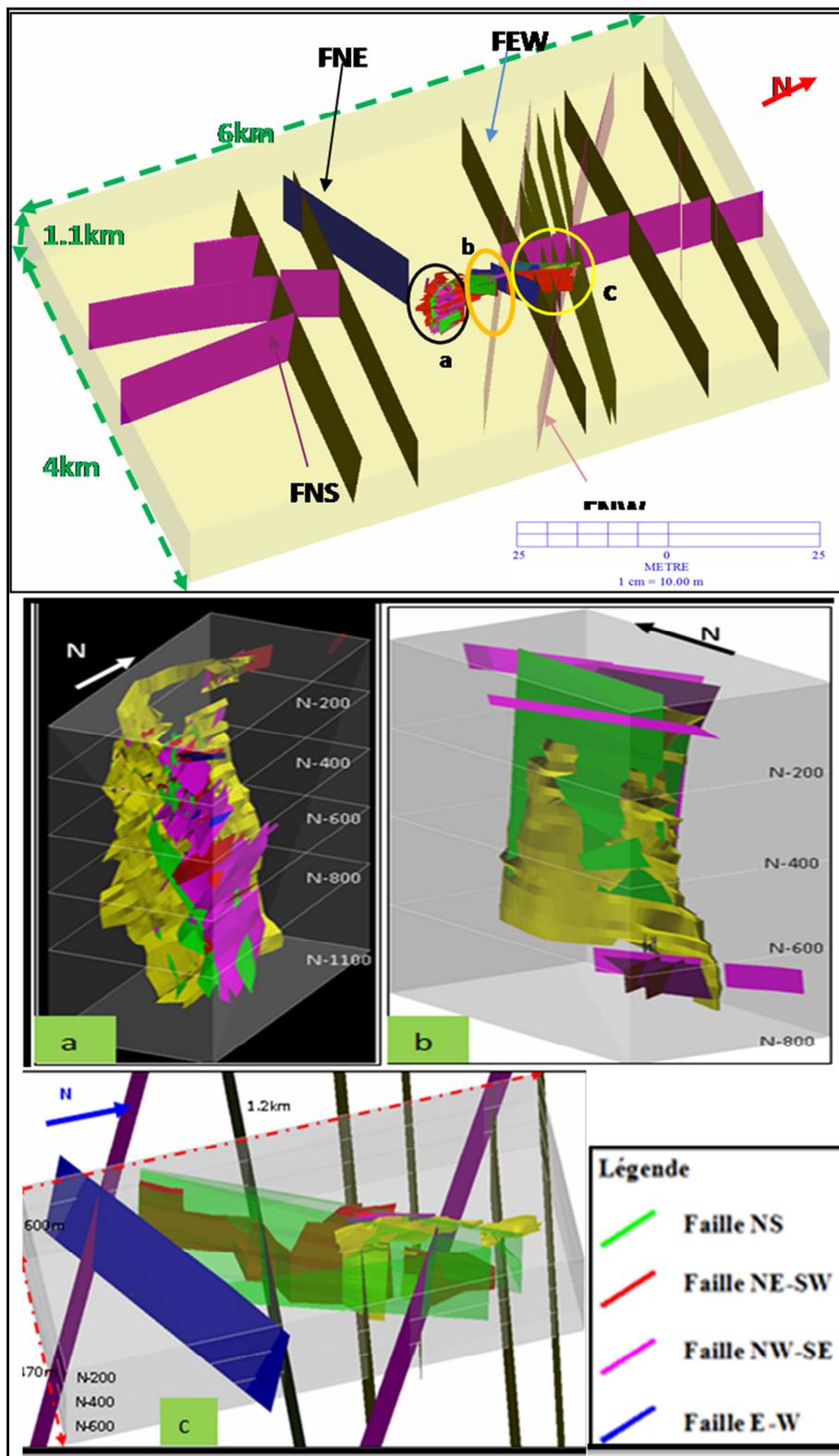


Fig.6. Vue en 3D des failles régionales interprétées par géophysique, affectant les enivrants du gisement de Draa Sfar (DS).

NS : Faille N-S ; FNE : Faille NE- SW ; FEW : Faille E-W. Ce réseau de faille affecte aussi les trois blocs en 3D du gisement de DS 'en jaune' (a: Bloc sud ; b: Bloc central ; c: Bloc nord).

5.2 MODÉLISATION STRUCTURALE 3D

Les Jbilets centrales ont été affectées par l'orogénèse hercynienne et atlasique. Le secteur de Draa Sfar, qui fait partie de cette zone, était également sujet à ces déformations dont le résultat final est l'aspect morphologique actuel. D'où la nécessité de faire une modélisation 3D montrant les relations existantes entre le corps minéralisé et le réseau des failles qui l'affecte (fig. 6). A l'échelle régionale, l'utilisation des méthodes géophysiques magnétiques et gravimétriques a permis de localiser les anomalies magnétiques et gravimétriques et de dégager les zones faillées. A travers cette interprétation, il ressort que les failles majeures sont les suivantes :

- Failles E-W : Il s'agit de failles de décrochement à jeu dextre et dont l'une d'entre elles est superposée à l'Oued de Tensift (Failles Atlasiques) ;
- Failles N-S : Ce sont des failles de décrochement à jeu senestre. Ces failles ont changé de direction vers le Sud en devenant soit NNW-SSE ou NNE-SSW ;
- Failles NW-SE : Ce sont des failles de décrochement dextre. Cette série englobe deux types N100° et N120° ;
- Failles NE-SW.

L'analyse des recoupements entre failles montre la suite chronologique suivante :

- Les failles NS qui sont décalées par la famille N100° ;
- Les failles N100° sont prises dans un couloir créé par les failles N120° ;
- Les failles N120° sont décalées par les failles E-W ;
- Les failles de direction NE-SW ;
- Les failles E-W recoupent toutes les autres failles.

5.3 MODELISATION DU CORPS MINERALISE 3D

Dans le gisement de DS, la minéralisation est formée successivement par la pyrrhotite, la sphalérite, la galène, la chalcopryrite, l'arsénopyrite et par la pyrite [15] et [16]. La modélisation 3D du corps minéralisé a permis la connaissance de sa géométrie et a montré son enracinement en profondeur. C'est ainsi qu'il apparaît sous forme d'une mégalentille verticale étendue sur une longueur de 1.2km (fig. 7), avec une profondeur de plus d'1 km dans le BS et dans le BC. Elle est généralement à vergence ouest, avec un fort pendage vers l'Est et son épaisseur varie de 0,5 à 40 m (fig. 7). Cette lentille minéralisée présente plusieurs faciès à compositions et à textures différentes (fig. 8 et 9).

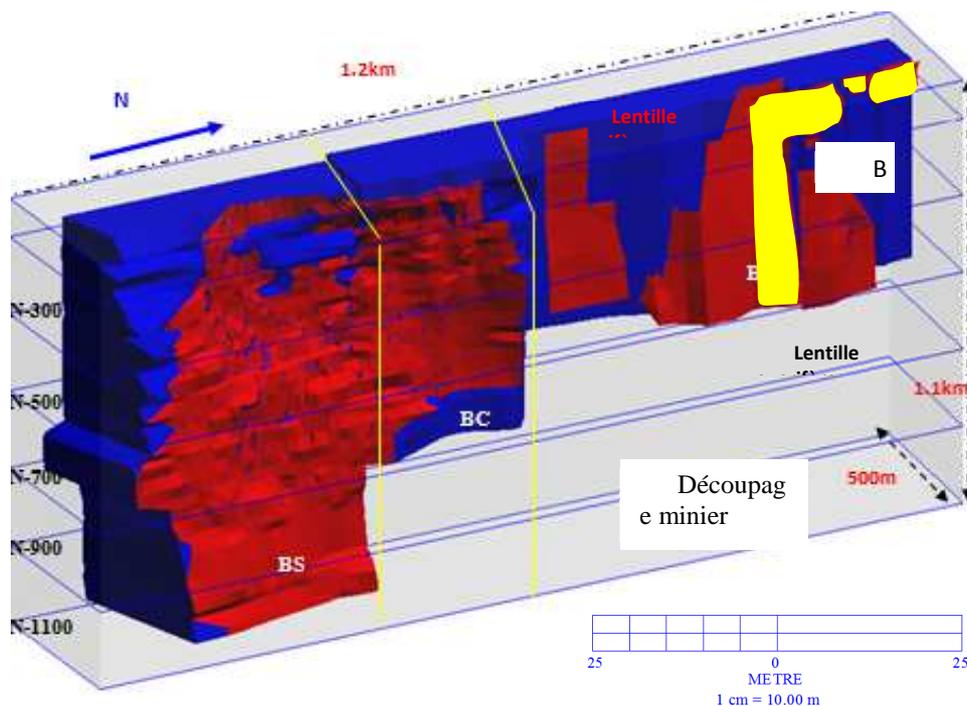


Fig.7. Représentation en3D du corps minéralisé du gisement de Draa Sfar et des pélites carbonatées du toit (en bleu). La minéralisation est essentiellement représentée par une lentille zincifère (en rouge) et accessoirement par une lentille cuprifère (en jaune) visible surtout au bloc nord (BN). BS : Bloc sud ; BC : Bloc central.



Fig.8. Minerai massif à pyrrhotite du gisement de Draa Sfar



Fig.9. Minéralisation du gisement de Draa Sfar interstratifiée à chalcopyrite avec des niveaux schisteux.

5.4 MODÉLISATIONS GÉOCHIMIQUES 2D ET 3D

5.4.1 COURBES DES ISOPOUSSIANCES

Les cartes d'isopuissances ont été réalisées en utilisant le logiciel Surfer. Ce dernier permet de créer des grilles qui vont interpoler les données irrégulières des points X, Y et Z afin de les ordonner. Notons que l'axe Z correspond à la puissance horizontale des passes minéralisées interceptées par les sondages. L'établissement de ces cartes a montré l'existence d'une zone à grande puissance qui s'enracine en profondeur vers le bloc central. Ce dernier constat pourrait être révélateur de la continuité de la minéralisation vers l'aval du bloc central (fig. 10) d'une part, et de la paléotopographie en ondulation du bassin de dépôt [17], d'autre part.

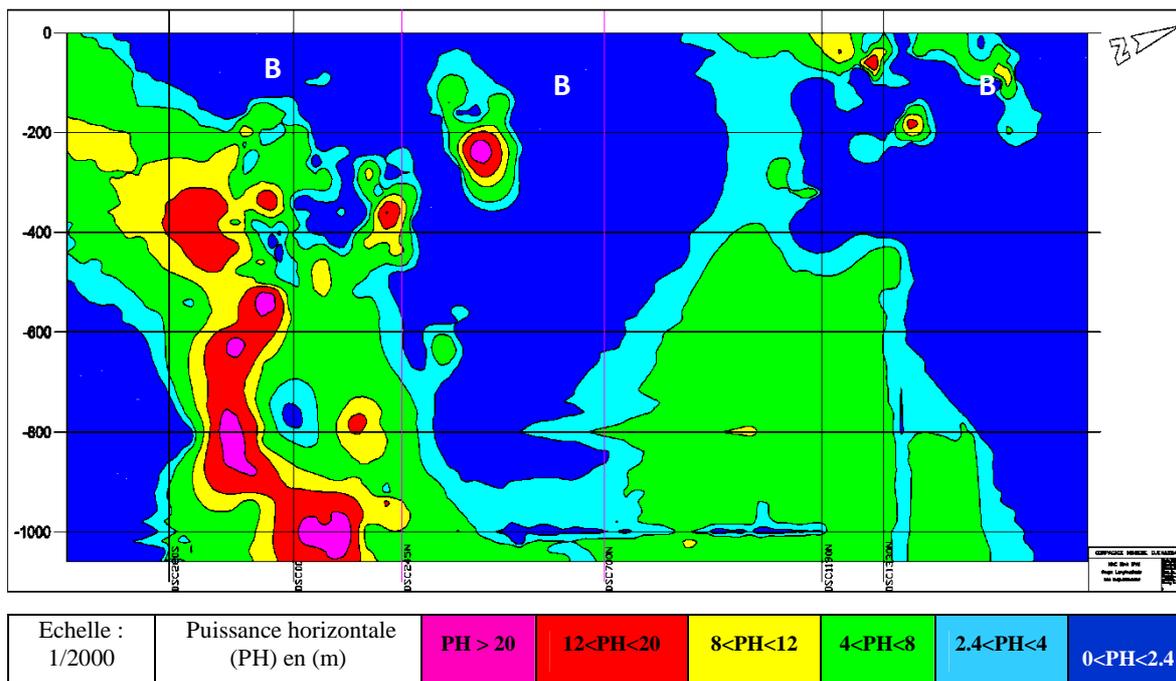


Fig. 10. Coupe longitudinale des courbes d'isopuissances horizontale (PH) du corps minéralisé du gisement de Draa Sfar

5.4.2 DISTRIBUTION DES ÉLÉMENTS MAJEURS

La réaction entre les fluides hydrothermaux et la roche encaissante s'accompagne d'échanges chimiques qui modifient sa composition initiale [18], [19]. Afin de comprendre le comportement des éléments chimiques Na_2O , CaO , K_2O , Fe_2O_3 et MgO vis-à-vis du corps minéralisé, nous avons suivi le changement de leurs teneurs en fonction de la profondeur dans le sondage DS125 qui traverse tous les faciès de la série volcanosédimentaire. L'analyse de la distribution de ces éléments permet de dégager les observations suivantes (fig. 11) :

Au niveau du mur immédiat de la minéralisation, on observe des teneurs importantes de MgO et de Fe_2O_3 alors que Na_2O , CaO et K_2O enregistrent des teneurs basses. La perte du K_2O et l'ajout de Fe_2O_3 ainsi que du MgO indiquent une diminution de la séricite et un enrichissement de chlorite au mur de la minéralisation.

Au niveau du toit, on remarque un enrichissement important en K_2O , Na_2O , et un enrichissement modéré en CaO tandis que MgO et Fe_2O_3 affichent des teneurs faibles. On remarque que K_2O et CaO affichent de bonnes teneurs au mur plus loin de la minéralisation.

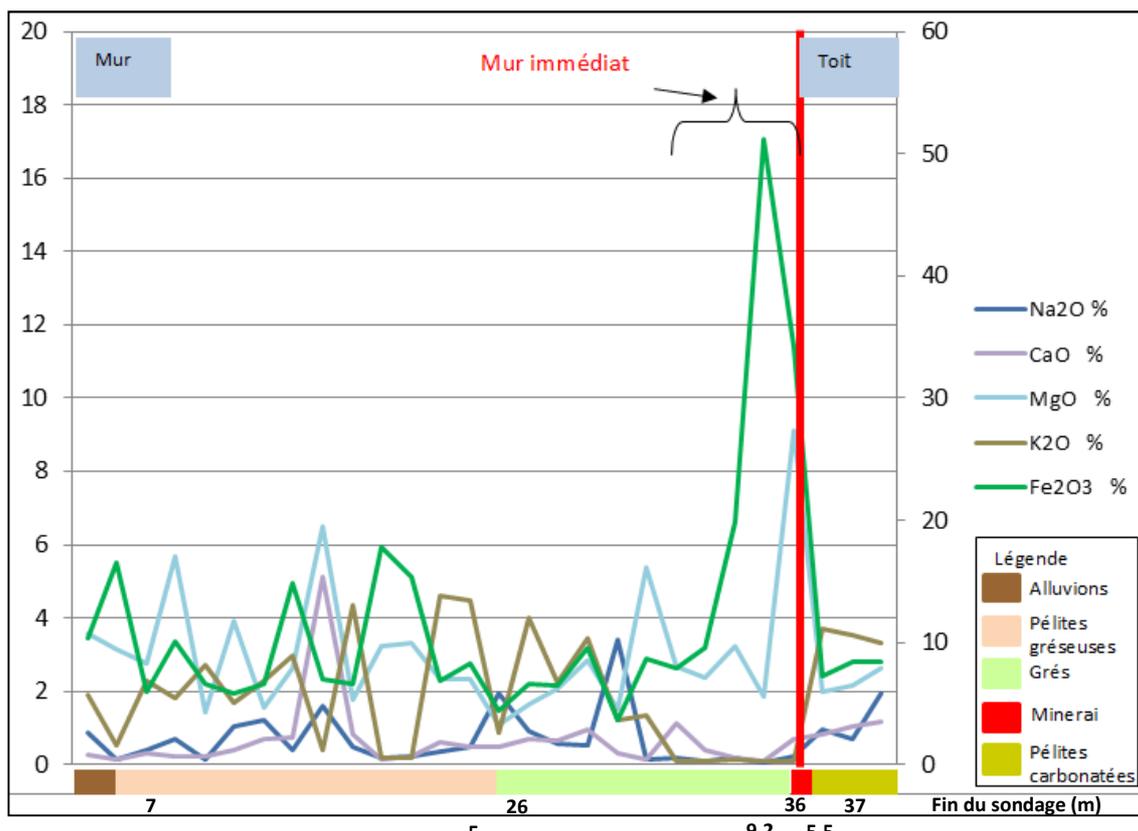


Fig. 11. Variation des éléments majeurs aux environs du corps minéralisé du gisement de Draa Sfar, dans les faciès du sondage DS125

La distribution de ces éléments chimiques dans l'enceinte des corps minéralisés de DS, témoigne de la circulation de fluides hydrothermaux syn et post minéralisation [13], liés notamment à une redistribution des métaux. Ces anomalies géochimiques dans l'enceinte peuvent être considérées comme un outil d'exploration dans un contexte géologique similaire à celui du gisement de Draa Sfar.

Pour quantifier l'intensité relative de l'altération autour de la minéralisation, nous avons utilisé les deux indices d'altération : l'indice de chlorite de formule $[I_{chlo} = 100 * (Fe_2O_3 + MgO) / (Fe_2O_3 + MgO + 2CaO + 2Na_2O)]$ et l'indice de séricite dont la formule est $[I_{SER} = 100 * K_2O / (K_2O + Na_2O)]$ [20].

Le diagramme des indices d'altération (fig.12) montre l'importance des degrés des deux indices ce qui indique qu'une forte activité hydrothermale a affecté la série volcanosédimentaire. De plus, la comparaison entre les deux indices a permis de conclure que la chloritisation est importante au mur immédiat de la minéralisation et que la séricitisation caractérise le toit.

5.4.3 DISTRIBUTION SPATIALE DES MÉTAUX

Dans les corps minéralisés de DS, la connaissance de la distribution spatiale des éléments métalliques, tels que Zn, Pb, Cu, Fe, Ag, Co et Or, permet de délimiter les zones d'enrichissement au niveau du gisement. Ceci pourrait être atteint par l'application d'une méthode d'interpolation et de quantification des variables telle que la méthode de krigeage [21].

5.4.3.1 DISTRIBUTION DES MÉTAUX

Les résultats des études statistiques des échantillons des trois blocs (tab. 2), montrent que le BS présente une population homogène avec des coefficients de variabilité relativement faibles. Le BC est caractérisé par une population plus hétérogène malgré la continuité morphologique entre les deux blocs. Cela est distingué à partir des coefficients de variation qui sont plus

élevés et le grand écart existant entre la moyenne et la médiane des variables. Alors que, dans le BN, on note une grande variabilité et une homogénéité modérée dans la population statistique en comparaison avec celle du BS.

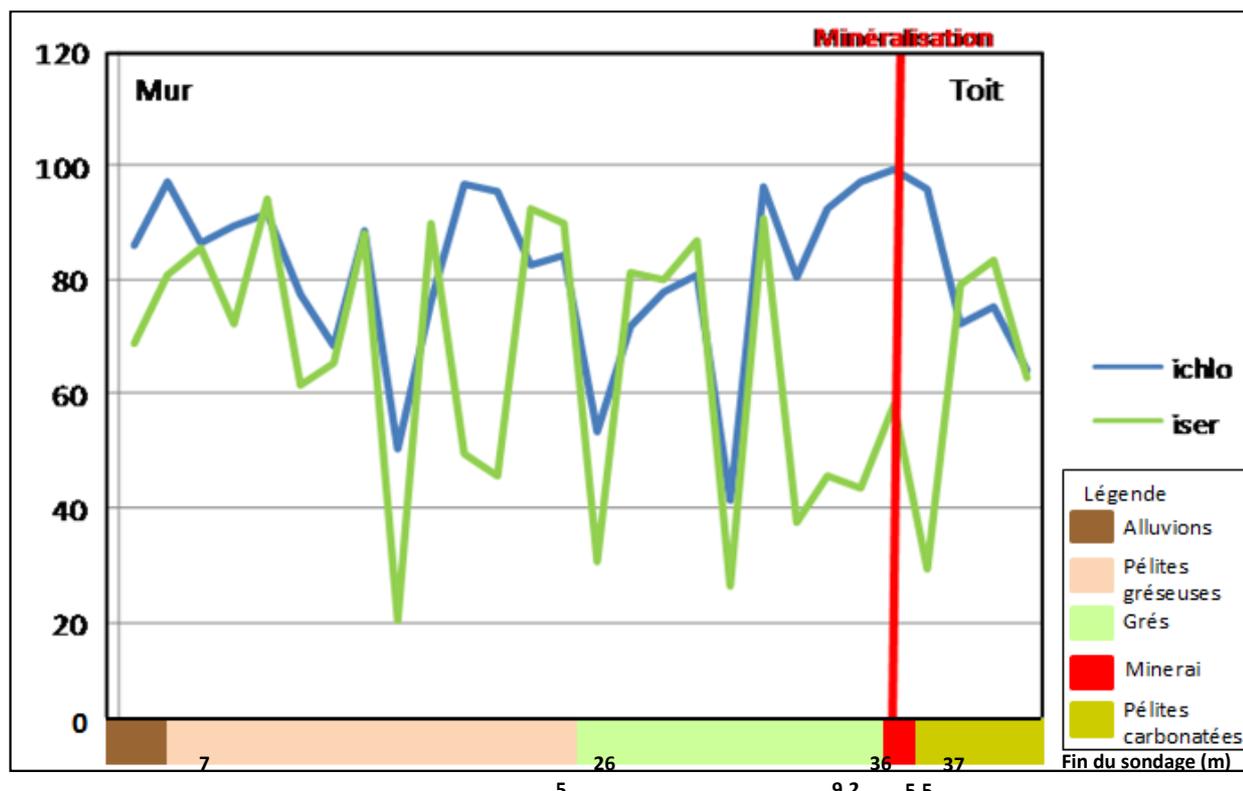


Fig. 12. Variation des éléments majeurs aux enivrants du corps minéralisé dans les faciès du sondage DS125 du gisement de Draa Sfar

De point de vue quantitatif des éléments chimiques, on note une richesse en Zn, Pb et Ag dans le BS. Ces éléments s'appauvrissent progressivement dans le BC et deviennent très faibles dans le BN. Alors que les teneurs en Co et en Cu diminuent progressivement du BN au BS (fig. 13 et 14).

Aussi, la distribution spatiale du Zn, du Pb, du Cu et du Fe dans la lentille zincifère du gisement de Draa Sfar montre qu'au niveau du BS s'affichent de bonnes teneurs en Zn avec une moyenne de 6% (fig.15a et tab. 2). Le plomb se comporte de la même façon que le zinc (fig.15b). La zonalité pour le cuivre est différente. Cette dernière est caractérisée par l'alternance de bandes riches et de bandes pauvres en cet élément, avec un pitch vers le nord dans le BS et le BC. La distribution du cuivre est inverse par rapport à celle du zinc et du plomb. Les fortes concentrations en cuivre sont enregistrées dans le BN (fig.15c). Pour le fer, les fortes concentrations se trouvent dans le BS et le BC. Ces teneurs diminuent sensiblement dans le BN (fig.15d et tab. 2).

Tableau 2 : Statistiques générales du zinc, plomb, cuivre, fer, argent, cobalt et or des trois blocs du gisement de Draa Sfar

Bloc	Elément	Médiane	Moyenne	Coefficient de variation
Bloc Sud (BS)	Zn %	6.13	6.20	0.45
	Pb %	2.45	2.16	0.68
	Cu %	0.30	0.31	0.37
	Fe %	37.96	39.12	0.22
	Ag g/t	40.18	37	0.69
	Co g/t	40.30	21	2.74
	Or g/t	0.1	0.07	1.10
Bloc Centre (BC)	Zn %	2.17	3.10	0.89
	Pb %	0.14	0.61	1.73
	Cu %	0.38	0.40	0.50
	Fe %	44.90	41.29	0.29
	Ag g/t	8	14.28	1.03
	Co g/t	82.72	100.17	1.44
	Or g/t	0.17	0.06	1.70
Bloc Nord (BN)	Zn %	0.01	0.42	3.43
	Pb %	0.007	0.17	4.43
	Cu %	0.17	0.58	1.81
	Fe %	15.22	20.74	0.74
	Ag g/t	5	7.01	1.10
	Co g/t	99.40	215.6	1.42
	Or g/t	0.05	0.16	2.11

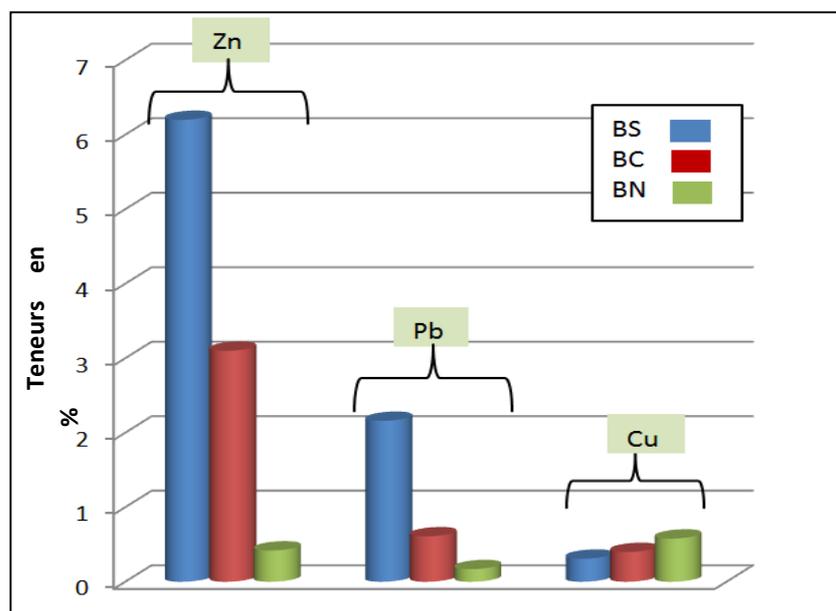


Fig. 13. Variation des teneurs du Zn, Pb et Cu dans les trois blocs du gisement de Draa Sfar

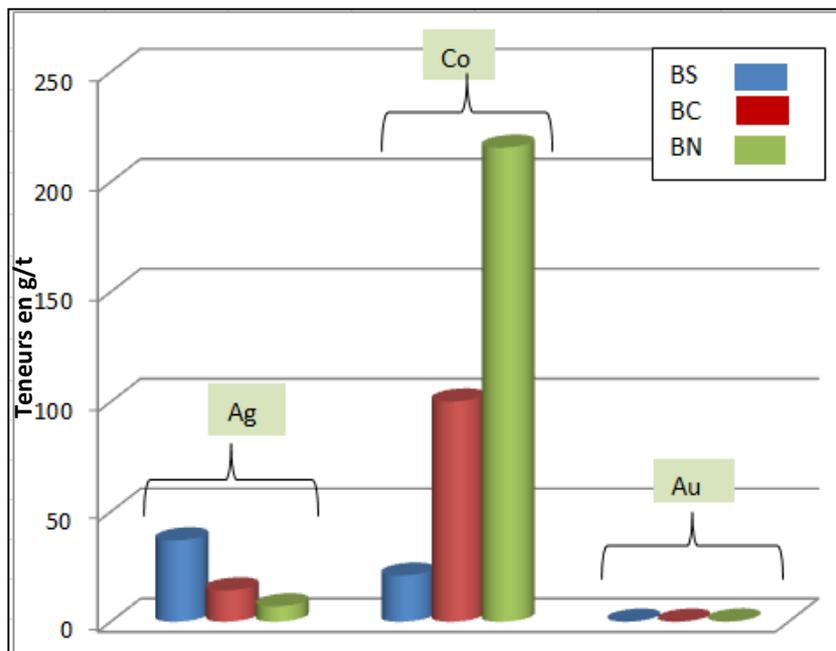


Fig. 14. Variation des teneurs de Ag, Co et Au dans le gisement de Draa Sfar

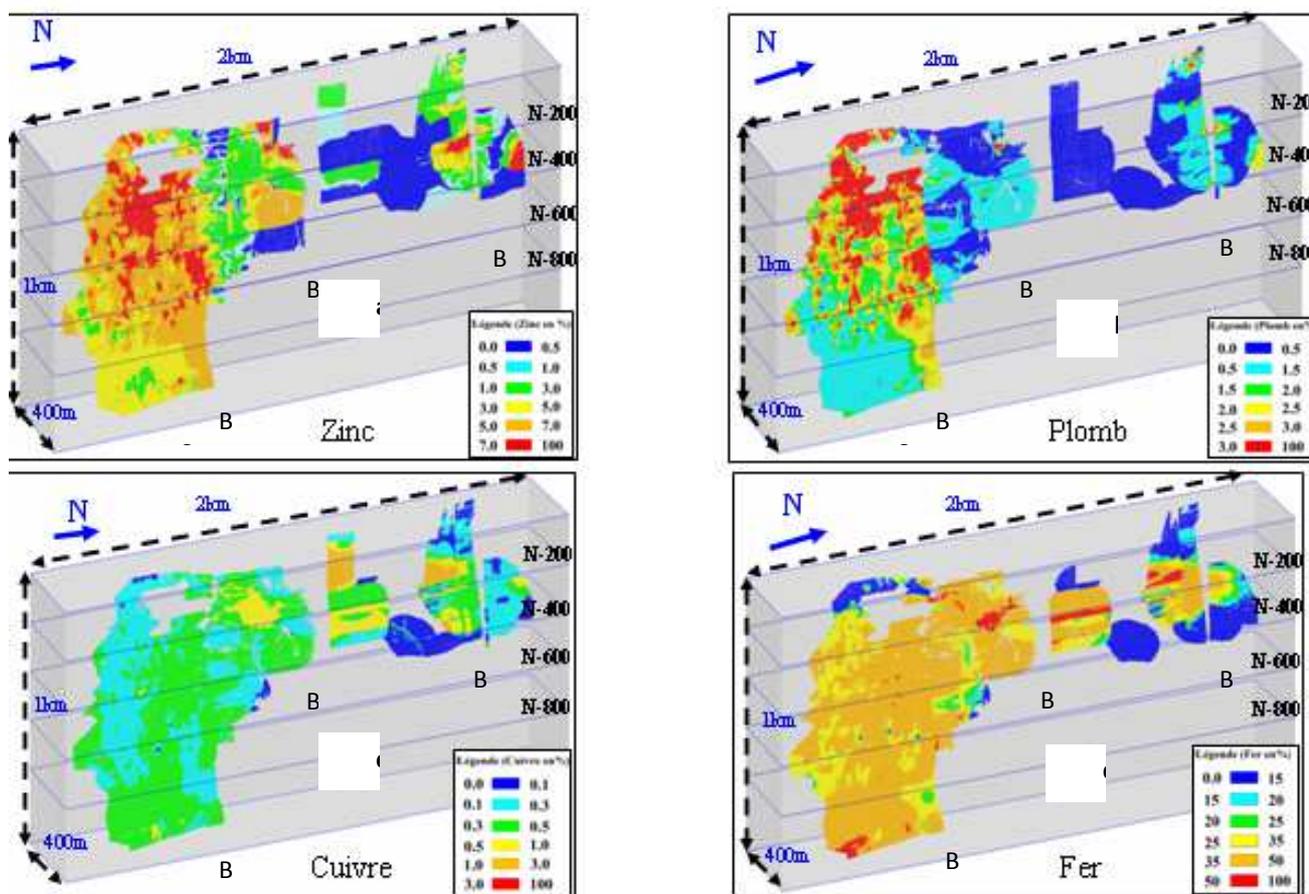


Fig.15. Distribution spatiale du zinc (a), du plomb (b), du cuivre (c) et du fer (d) dans la lentille zincifère du gisement de Draa Sfar

6 INTERPRÉTATION ET DISCUSSION

Le gisement de Draa Sfar est formé d'une minéralisation polymétallique à Zn, Pb et Cu de type amas sulfuré volcanogène, dans un encaissant d'âge Viséen supérieur-Namurien.

Les effets de différentes phases de l'orogénèse hercynienne ainsi que de la tectonique atlasique sont bien enregistrées aussi bien dans le corps minéralisé que dans son encaissant. En effet, à l'échelle du gisement de DS, plusieurs familles de failles ont été observées. La visualisation 3D des failles (fig. 6) montre que le bloc sud a été affecté par différentes familles de failles avec dominance des failles de direction NS et NW-SE. Dans le bloc central, on remarque que la lentille minéralisée est plus déformée, en comparaison avec celle du bloc sud, et les failles les plus dominantes sont de direction NS et NE-SW (fig. 6b). Alors que dans le bloc nord, les deux lentilles, zincifère et cuprifère, sont situées dans un couloir de cisaillement soit à jeu senestre de direction NE-SW ou à jeu dextre de direction E-W. La minéralisation à Draa Sfar est donc largement contrôlée par la tectonique dès sa mise en place et après son dépôt. Les effets de différentes phases de l'orogénèse hercynienne ainsi que de la tectonique atlasique sont bien enregistrées aussi bien dans le corps minéralisé que dans son encaissant. La phase synsédimentaire liée à la mise en place du dôme rhyodacitique ainsi que le dépôt des sulfures est caractérisée par des failles NW-SE. Elles ont tracé le chemin de dépôt du corps minéralisé vers le NW et NE. La phase D1 d'âge Namurien-Westphalien Inférieur est responsable de la remise à la verticale des lentilles et leurs encaissants [1]. Les cisaillements de direction NNE-SSW à jeu senestre ont engendré des formes sigmoïdales des lentilles ainsi que la séparation entre le bloc central et le bloc nord. Les effets de la phase D2 d'âge Namurien-Westphalien Inférieur sont présentés par l'épaississement des structures minéralisées dû à l'effet des cisaillements. La phase D3 d'âge Post Westphalien s'est manifestée par l'apparition de plusieurs familles de failles, ce qui a abouti au décalage du corps minéralisé dans le bloc sud, selon un jeu de décrochement à rejet dextre ou senestre. Le déversement généralisé des structures vers l'Ouest traduit une tectonique tangentielle à déplacement global Ouest. Cette déformation essentiellement ductile est reprise par une tectonique cassante tardive à post hercynienne résultant d'un serrage N-S probablement atlasique.

La modélisation 3D du corps minéralisé de DS nous a permis de caractériser sa morphologie en lentilles aplaties, dilacérées et orientées dans la direction NS, avec une extension longitudinale de 1.2km. Il est subdivisé du sud au nord en deux zones. Le Draa Sfar Sud englobe le BS et BC et le Draa Sfar Nord ou BN, avec une profondeur dépassant 1km. En allant du sud vers le nord, ce corps connaît des variations morphologiques avec une diminution de sa puissance et des déformations qui sont nettes. La relation entre le corps minéralisé et son encaissant apparaît normale du côté mur.

En général, la mise en place des minéralisations est caractérisée par des gisements riches en zinc sous la barre des températures de 300°C et riches en cuivre au-dessous de cette température [22]. L'analyse de la distribution spatiale des métaux dans les modèles géochimiques 2D et 3D, a montré l'existence d'une zonalité géochimique avec une richesse en zinc et en plomb dans le BS ; alors que le BN est riche en cuivre, cobalt et peu concentré en or. Ce constat peut être lié à la différence du degré de solubilité de ces éléments chimiques. En effet, le Cu est mobilisé par les fluides les plus chauds et apparaît à la dernière étape de chauffage du système [23] et [24]. Il caractérise alors les zones internes ou centrales des lentilles. Alors que, le zinc est transporté par les fluides de faible température et s'est déposé dans les périphéries des lentilles (zone externe). Aussi, le plomb s'est déposé dans les zones où la température est faible [25]. Ceci pourrait expliquer la corrélation positive existante entre le zinc et le plomb d'une part, et la zonalité observée dans la lentille minéralisée de DS d'autre part. Le BN qui apparaît plus riche en or constitue une cible potentielle de recherche de ce métal précieux dans cette partie du gisement.

Les coupes des isopuissances, pour leur part, nous donnent l'espoir quant à la continuité de la minéralisation en profondeur, tout en favorisant des emplacements relatifs à des paléo-structures en bande de direction NW. En joignant les coupes des isopuissances à celles de la distribution spatiale des métaux, nous avons dégagé des zones de richesse en zinc dans le BS et celles en cuivre dans le BN. Ce résultat pourra permettre de guider les futurs travaux d'exploitation au moment de fluctuation des cours des métaux.

Par ailleurs, les altérations de séricite et de chlorite sont des composantes généralement associées aux minéralisations de type sulfures massifs volcanogènes [26]. Cette altération se traduit par l'ajout ou le lessivage de certains éléments majeurs. En effet, en se rapprochant du corps minéralisé, on note une diminution de la teneur en SiO₂ et K₂O, tandis que la teneur en MgO augmente ; en accord avec la forte chloritisation observée à l'approche de la minéralisation.

7 CONCLUSION

L'interprétation quantitative des données géologiques, géophysiques, géochimiques et l'estimation des ressources permettent de définir de nouvelles cibles d'exploration minière. Ainsi, la modélisation géologique 3D multivariée à l'échelle du gisement nous a permis la délimitation des zones minéralisées. Ce modèle 3D a été construit par l'intégration de données géoscientifiques géoréférencées et a permis d'avoir une idée sur la morphologie du corps minéralisé de Draa Sfar. Ce dernier se présente sous la forme d'une mégalente aplatie et étendue sur environ de 1.2Km et s'enracinant sur de plus d'1km avec une épaisseur variant de 0,5 à 35m.

La minéralisation est largement contrôlée par les grands traits géodynamiques de différentes phases de l'orogénèse hercynienne ainsi que de la tectonique atlasique qu'a connue la région de Draa Sfar.

La minéralisation est encaissée entre l'ensemble basal, formé par des séries sédimentaires, volcaniques acides et pyroclastiques, et un ensemble sommital formé par des pélites fines, noirâtres et carbonatées. Actuellement, les travaux miniers montrent la continuité de la minéralisation vers les profondeurs du corps minéralisé. De plus, les zones riches en zinc et plomb ont été localisées dans le BS, alors que le BN est plus riche en cuivre et relativement plus riche en or. En conséquence, l'exploitation actuelle du gisement est suivie en orientant les travaux vers les zones à forts tonnages ou en bonnes teneurs en se basant sur des guides d'exploration telles que la présence des minéraux d'altération hydrothermale qui sont la séricite et le chlorite.

Ces résultats, qui sont d'une grande importance pour le développement de l'activité d'extraction minière dans le gisement de Draa Sfar, pourraient être utilisés dans les programmes d'exploration d'autres gisements dans les Jebilets Centrales.

REFERENCES

- [1] Huvelin P. (1977). "Etude géologique et gîtologique du massif hercynien des Jbilets (Maroc occidental) ". *Notes et Mem. Serv. Géol. (Maroc)*. 232 bis.
- [2] Faure S. (2010). Reconnaissance des structures synvolcaniques majeurs dans les environnements des sulfures massifs volcanogènes, nord-ouest de la Sous –province d'Abitibi. *Rapport, Projet CONSOREM 2009-04, 34p*.
- [3] Bernardine C. (1989). Interprétation gravimétrique et structure profonde de la Meseta marocaine et de sa marge atlantique. *Travaux des laboratoires des Sciences de la Terre. Univ. Aix Marseille, Série B, 29, 134p*.
- [4] Rosé F. (1987). Pétrogenèse des granitoïdes hercyniens du Maroc. Thèse. Doct. Univ. Paris VI.
- [5] Bamoumen H. (1988). Géométrie et cinématique de la déformation dans les nappes des Jbilets centre-orientales, Maroc. Thèse 3ème cycle, Université Cadi Ayyad, Marrakech, 189 pp.
- [6] Huvelin P. (1961). Sur l'âge Viséen Supérieur des Schistes de Kettara et de Djebel Sarhlef (Jebilets Centrales, Maroc). *Compte Rendu Sommaire Société Géologique (France)*. N°. 10, p. 290-291.
- [7] Bordonaro M. (1983). Tectonique et pétrographie du district à pyrrhotite de Kettara (Paléozoïque des Jbilets, Maroc). Thèse de 3ème cycle, Université. Strasbourg, 132 pp.
- [8] Essaifi A. et al, (2013). U–Pb dating: emplacement age of the bimodal magmatism of Central Jbilets (Variscan Belt, Morocco): Geodynamic implications. *Science Direct*. 188-203.
- [9] Aarab EM. et Beauchamp J. (1987). Le magmatisme carbonifère pré-orogénique des Jbilets centrales (Maroc). Précisions pétrographiques et sédimentaires. Implications géodynamiques. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris 304, 169–74*.
- [10] Aarab EM. (1995). Genèse et différenciation d'un magma tholeiitique en domaine extensif intracontinental, l'exemple du magmatisme pré-orogénique des Jbilets (Maroc hercynien). Thèse de doctorat d'Etat. Univ. Marrakech. 251 p.
- [11] Gigout M. 1951. "Etudes géologiques sur la Meseta marocaine (arrière-pays de Casablanca, Mazagan et Safi) ". *Notes et Mémoires du Service géologique, Rabat 86*, I: texte, 507 p., II: atlas, XVIII + 9 pls.
- [11] Gaillet J. L and Bordonaro M. (1981). "Tectogenèse hercynienne dans le massif dinantien des Jbilets centrales (Maroc) ". *Sci. Géol. Bull. Strasbourg*. 34, p. 117-122.
- [12] Bouloton J. et Le Corre C. (1985). "Le problème de la tectonique tangentielle dans les Jbilets (Maroc hercynien) : Données et hypothèses". *Hercynica*. 2, p 121-129.
- [13] Ben Aissi L. (2008). Contribution à l'étude gîtologique des amas sulfurés polymétalliques de Draa Sfar et de Koudiat Aïcha: comparaison avec les gisements de Ben Sliman et de Kettara (Jebilets centrales, Maroc hercynien). Thèse de Doctorat présentée à la Faculté des Sciences Semlalia Marrakech, Maroc.

- [14] Rziki S. (2006). Contribution à l'étude géologique du gisement polymétallique de Draa Sfar, Jebilet centrales, Maroc. Mémoire de fin d'études supérieures spécialisées, Université Cadi ayyad, Faculté des sciences et technique Guéliz, Marrakech, 108 pp.
- [15] Marcoux E, Belkabar A, Gibson HL, Lentz D, Ruffet G. (2008) "Draa Sfar, Morocco: a Visean (331 Ma) pyrrhotite-rich, polymetallic volcanogenic massive sulphide deposit in a Hercynian sediment dominant terrane". *Ore Geol Rev* 33:307–328
- [16] Rziki S. (2012). Environnement géologique et modèle 3D du gisement polymétallique de Draa Sfar (Massif hercynien des Jebilet, Maroc) : Implications et perspectives de développement. Thèse de Doctorat Présentée à la Faculté des Sciences Semlalia Marrakech, Maroc ,294p.
- [17] Rziki S.; Alansari A.;Mouguina E.M.;Simard J.;Zouhair M. et Maacha L. (2011). "Apport du modèle géologique et géophysique 3D dans le développement du gisement polymétallique de Draa Sfar (Massif hercynien des Jebilet centrales, Maroc) ". *Estudios Geológicos*, doi:10.3989/egeol.40366.138.
- [18] Belkabar A., Gibson H., Marcoux E., Lentz D. et Rziki S. (2007). "Geology and wall-rock alteration at the Hercynian Draa Sfar Zn–Pb–Cu Deposit, Morocco". *Ore Geology Reviews*, p 20.
- [19] Essaifi A. and Hibti M. (2008). "The hydrothermal system of Central Jebilet (Variscan Belt, Morocco): A genetic association between bimodal plutonism and massive sulphide deposits". *Science Direct*.188-203.
- [20] Saeki Y. and Date J. (1980). "Computer application to the alteration data of the footwall dacite lava at the Ezuri kuroko deposits". *Mining Geology*, v. 30, no. 4, p. 241–250.
- [21] Matheron. G, (1965). Les variables régionalisées et leur estimation: une application de la théorie des fonctions aléatoires aux sciences de la nature. *Masson, print book*, 306 pages.
- [22] Hannington M. D and Scott S. D. (1988). "Gold and silver potential of polymetallic sulfide deposits on the sea floor". *Mar. Mining* 7, p. 271–285.
- [23] Franklin J.M. (1993). "Volcanic-associated massive sulphide deposits", in: Kirkham R.V., Sinclair W.D., Thorpe R.I., and Duke J.M., eds., *Mineral deposit modeling, Geological Association of Canada Special Paper* 40, p. 315-34.
- [24] Lydon, J.W. (1984). "Volcanogenic massive sulphide deposits, Part 1: A descriptive model"; *Geoscience Canada*, v. 11, p. 195-202.
- [25] Mathieu. L. (2013). Opportunité pour les sulfures massifs volcanogènes riches en Ag. *Rapport, Projet CONSOREM 2012-08*, 69 p.
- [26] Thompson A.J.B. and Thompson J.F.H. (1996). "Atlas of alteration: A field and petrographic guide to hydrothermal alteration minerals". *Geological Association of Canada, Minerals Deposits Division Serie*, Ottawa, 119 pp.