

Apport de la géochimie du sol et de la géostatistique à la prospection des gisements de sulfures massifs : cas du gisement hercynien polymétallique Zn-Cu-Pb de Koudiat Aïcha, Jebilet centrales, Maroc

Fouad LOTFI^{1*} et Solange BRUNET²

*¹ Université Ibn Zohr, Faculté Polydisciplinaire de Taroudant, Hay El Mohammadi (Lastah),
BP 271, 83 000 Taroudant, Maroc*

Exploration et Gestion des Ressources Naturelles et Environnementale (EGERNE), Maroc

² Reminex-MANAGEM

* Correspondance, courriel : lotfi.fouad@gmail.com

Résumé

Un programme d'exploration géochimique du sol a été effectué au secteur du gisement de Koudiat Aïcha, durant les phases de prospection des terrains avoisinant l'ancienne mine de Kettra dans les Jebilet Centrales. Le gisement de Koudiat Aïcha à prédominance de pyrrhotite, renferme des minéraux à métaux de base à Pb, Zn et Cu. Il est encaissé au sein des argilites de la série de Saghlef attribuée au Viséen supérieur intercalées par des sills de gabbro montre à l'affleurement un chapeau de fer bien développé à minéraux d'oxydes et hydroxydes de fer (hématite, goethite et ocres) orienté NS. Le sol du secteur de Koudiat Aïcha analysé présente une signature géochimique essentiellement zincifère. Seuls les éléments chimiques du sol tels que Pb, Zn, Bi, et Cd montrent des corrélations et ont permis de cerner l'emplacement du gisement de Koudiat Aïcha (Pb-Zn) ainsi que sa zone nourricière (Bi-Cd). La compilation des données et des résultats obtenus de la géologie et de la géochimie sont en bonne concordance avec les résultats des études magnétiques et gravimétriques effectuées au sol dans le secteur. Ces résultats peuvent être appliqués comme guide de prospection autour des indices ferrugineux avoisinant le secteur de Koudiat Aïcha dans les Jebilet centrales voire leurs extrapolations vers l'ensemble des terrains hercyniens marocains.

Mots-clés : *Jebilet centrales, Koudiat Aïcha, exploration géochimique, sol.*

Abstract

Contribution of soil geochemistry and geostatistics to the prospecting of massive sulphides deposit : case of the Hercynian polymetallic deposit of Koudiat Aïcha Zn-Cu-Pb, Jebilet central, Morocco

A geochemical soil exploration program was carried out at the field of the Koudiat Aïcha deposit, during the phases of prospecting of the land surrounding the old Kettra mine in the Jebilet Centrales. The predominantly pyrrhotite Koudiat Aïcha deposit contains base metals minerals of Pb, Zn and Cu. It is enclosed within the argillites of the Saghlef series attributed to the upper Viséen intercalated by gabbro sills shows at the outcrop a well developed gossan with oxide and hydroxides minerals of iron (hematite, goethite), oriented NS. The soil of the area of Koudiat Aïcha analyzed presents a geochemical signature essentially zinciferous. Only soil

chemicals such as Pb, Zn, Bi, and Cd, show correlations and identify the location of the Koudiat Aïcha deposit (Pb-Zn) and its feeder zone (Bi-Cd). The compilation of data and results obtained from geology and geochemistry are in good agreement with the results of the magnetic and gravimetric studies carried out on the ground in the sector. These results can be applied as a prospecting guide around the ferruginous indices near the sector of Koudiat Aïcha in the central Jebilet, or even their extrapolations towards the whole of the Moroccan Hercynian lands.

Keywords : *central Jebilet, Koudiat Aïcha, geochemical soil, base metal.*

1. Introduction

Les gisements de sulfures massifs de type volcanogène présentent un mode de formation propre par rapport aux autres types de gisements. Ils sont formés localement par précipitation de sulfures sur le plancher sous marin, précédé de l'altération des roches encaissantes [1]. Afin d'explorer les provinces métallogéniques à amas sulfurés, les géologues doivent concevoir des programmes d'exploration dans le but de découvrir de nouvelles ressources minérales. Ces nouvelles ressources sollicitent d'être évalué et d'être délimité avant de faire l'objet d'investissements considérables pour les exploiter. La méthode de prospection classique faisant appel à la géophysique complétée d'une prospection géochimique tactique du sol dans les zones anormales permettra de délimiter rapidement les extensions des zones minéralisées et d'obtenir des indications de l'emplacement précis du corps minéralisé [2, 3]. Cependant, la prospection géochimique permet dans certains cas, de localiser à l'affleurement la zone proximale de la minéralisation située en profondeur [4]. Un prélèvement des échantillons de sol destinés à l'analyse pour les éléments métalliques recherchés ainsi que pour leurs éléments indicateurs serviront à l'élaboration des cartes de dispersion des différents éléments analysés [5]. La bonne interprétation des cartes géochimiques complétée par celles de géophysique pourra guider efficacement à la localisation du gisement et le lancement d'une campagne de sondages visant la profondeur. Cette étude rentre dans le cadre de la phase tactique de reconnaissance dont la problématique était le contrôle au sol des diverses anomalies géophysiques aéroportées en relation avec les chapeaux de fer dans les Jebilet Centrales. L'objectif principal de la présente étude de la prospection géochimique du sol entamée dans le secteur de Koudiat Aïcha était de préciser l'emplacement exact, la délimitation de l'extension générale du gisement de Koudiat Aïcha à métaux de base (Zn, Pb, Cu) ainsi de déterminer les éléments chimiques indicateurs en combinaison avec des traitements géostatistiques. Ces traitements permettent de visualiser la moindre variation significative d'élément indicateur dans le sol autour du présent gisement. Les résultats obtenus de la présente étude combinés au cumul des données géologiques et géophysiques du secteur de Koudiat Aïcha, permettront de concevoir et de développer une technique d'exploration valable pour l'ensemble des terrains hercyniens des Jebilet Centrales.

2. Présentation du secteur d'étude

2-1. Cadre géographique, géologique et minéralisation

Le secteur du gisement Koudiat Aïcha est situé dans la partie sud de la meseta Marocaine (*Figure 1a*), et précisément dans la partie centrale du massif hercynien des Jebilet (*Figure 1b*). Il est distant d'environ 7 km au SW de l'ancienne mine à pyrrhotite de Kettara, et à 32 km au NW de la ville de Marrakech (*Figure 1c*). Ce gisement est encaissé dans la série viséenne de Saghlef [6 - 9]. Le secteur de Koudiat Aïcha correspond à une anomalie magnétique aéroportée mise en évidence en 1963 par la Société Anonyme de Prospection Aéroportée (S.A.P.A). Le gisement de Koudiat Aïcha a été découvert suite à un levé magnétométrique au sol

sur les indices ferrugineux des secteurs avoisinants l'ancienne mine à pyrrhotine de Kettara (**Figure 1c**). Depuis, de nombreux travaux de recherches géologiques, géochimiques et géophysiques ainsi que des sondages carottés ont été entrepris dans le but d'intercepter la minéralisation en profondeur et de déterminer l'allure générale du corps minéralisé. Ces travaux ont permis de mettre en évidence des ressources potentielles en métaux de base d'environ 3.6 Mt à environ à 3 % Zn, 1 % Pb et 0.6 % Cu [8, 9]. Le secteur d'étude est formé par un ensemble de roches sédimentaires (80 %) et magmatiques (20 %) (**Figure 2**) [8 - 9]. La stratigraphie locale est partiellement oblitérée par l'effet conjoint de la déformation hercynienne et du métamorphisme de faible gradient. A l'affleurement, les sulfures sont pressentis par la présence d'un chapeau de fer bien développé à oxydes et hydroxydes de fer (**Figure 3**), dont l'extension latérale orientée NS dépasse les 120 m et de 3 à 15 m en largeur (**Figure 3a**), constitué essentiellement d'hématite, de goéthite, et quelques traces de malachite (**Figure 3b, c, d**). La minéralisation exprimée sous forme de lentilles massives est encaissée principalement entre les unités argilitiques supérieures de l'unité basale de Koudiat Aïcha (série supérieure de Saghlef) et l'unité sommitale carbonatée (série de Teksim). Elle forme un horizon à pyrrhotite sous forme de lentilles métriques à décamétriques allongées suivant la direction NS qui s'épaissit en profondeur (20 à 25 m). La minéralisation sulfurée est constituée essentiellement de pyrrhotite à laquelle s'associe de la sphalérite, la chalcopryrite, la galène, l'arsénopyrite, la stannite et quelques traces de pyrite secondaire. Tous les minéraux sulfurés présentent des stades anté à syntectoniques à l'exception de la pyrite marquant un stade tardif de mise en place suite à la transformation de la pyrrhotite. Sur la base des teneurs en des métaux de base de la minéralisation massive, le gisement de Koudiat Aïcha peut être classé dans la catégorie des gisements sulfurés zincifères.

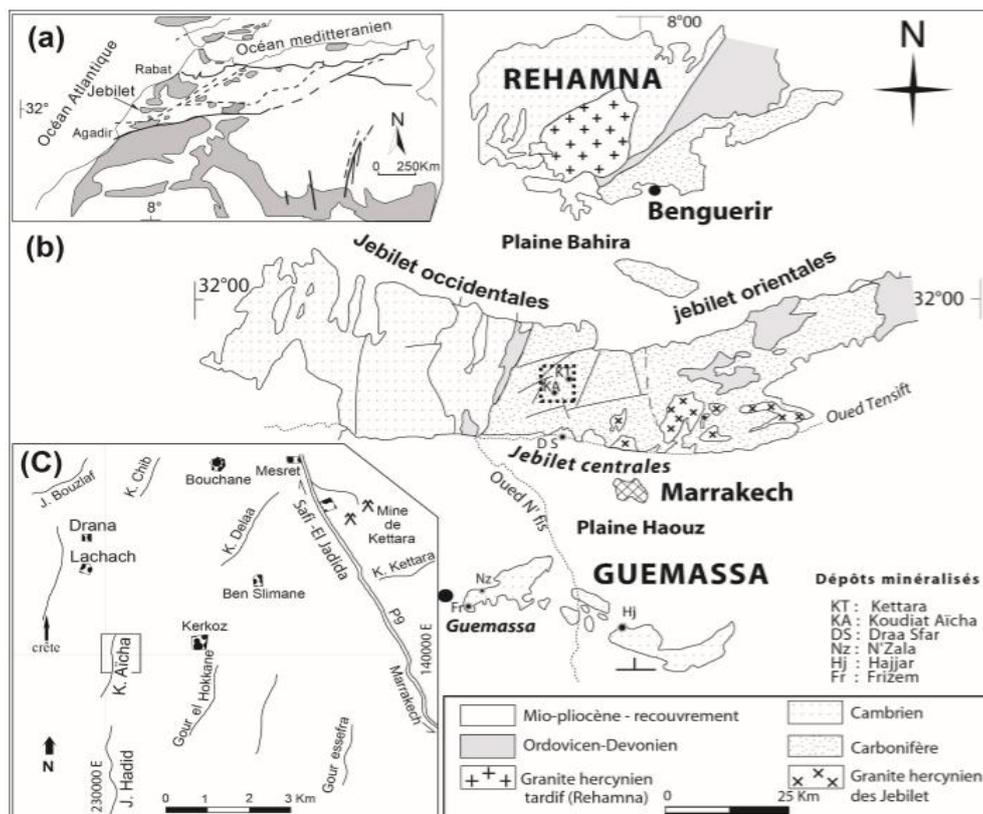


Figure 1 : a) Localisation géographique du massif des Jebilet et les affleurements hercyniens du nord-Afrique (en gris), b) Carte géologique simplifiée et localisations des principaux gisements sulfurés des massifs hercyniens des Jebilet et des Guemassa (Huvelin, 1977), c) situation géographique du secteur de Koudiat Aïcha

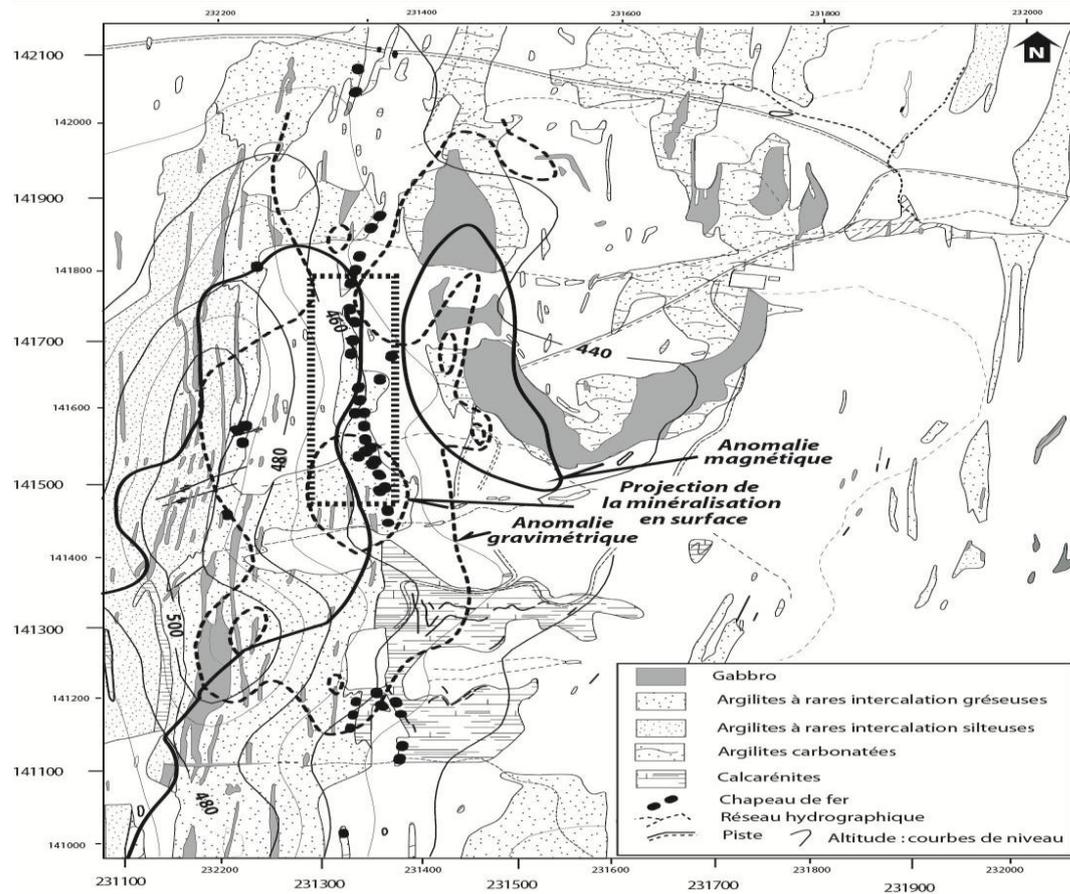


Figure 2 : Carte géologique de détail du secteur de Koudiat Aïcha et emplacement de l'anomalie magnétique et gravimétrique

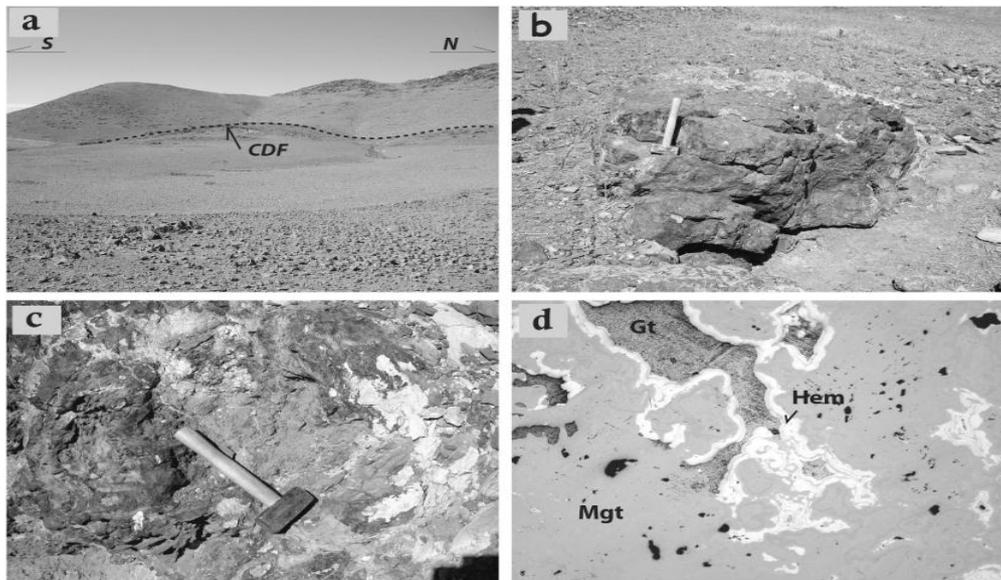


Figure 3 : (a) Panorama du gisement de Koudiat Aïcha et allure générale de l'alignement du chapeau de fer (CDF) dans le flanc Est de Koudiat Aïcha. (b, c) aperçus macroscopiques du chapeau de fer (riche en hématite, goethite, limonite, et traces de malachite). (d) aperçu microscopique du chapeau de fer (riche en hématite (Hem), magnétite (Mgt) et goethite (Gt))

2-2. Topographie, climat, sol et végétation

Le secteur de Koudiat Aïcha correspond à une crête orientée NS sur environ 1.5 Km de long, dont l'altitude ne dépasse pas 520 m, séparant deux versants opposés à plaines marquées par une altitude d'environ 410 m (**Figure 4**). En général, le climat dans le massif des Jebilet est continental typiquement aride à semi aride. Il est caractérisé par une saison "sèche" s'étendant sur la plus grande partie de l'année et une saison "humide" à courte durée en hiver. La température moyenne annuelle est de l'ordre de 17 °C qui pourrait atteindre des valeurs assez élevées en été (> 50°C). Les précipitations pluviales sont faibles (250 mm), généralement enregistrées en hiver, tandis qu'elles sont quasiment absentes à rarement enregistrées au cours des autres saisons de l'année. A Koudiat Aïcha, le sol est généralement brut. La roche mère est couverte, cependant elle est visible au niveau de la crête et peu transformée. Les horizons du sol n'y sont pas bien différenciés. La végétation y est pauvre voire absente. Les apports en matière organique sont quasi inexistantes.

3. Matériel et méthodes

Les échantillons du sol récoltés au niveau du secteur de Koudiat Aïcha s'étendent sur une superficie de quelques km². Des centaines d'échantillons ont été collectés le long des profils orientés NS. Ces derniers sont espacés de 100 m chacun. Sur chaque profil, les échantillons ont été prélevés tous les 25 m (**Figure 4**). Les profils verticaux du sol changent considérablement d'épaisseur dans toute la région de quelques centimètres à plusieurs dizaines de centimètres en fonction de la topographie et de l'altitude. Des tests d'orientation ont été réalisés pour évaluer le mode et le patron d'échantillonnage de la région pour prélever la fraction convenable de l'échantillon destiné à l'analyse. Les échantillons prélevés ont été analysés par ICP-AES au laboratoire d'analyse géochimique de Reminex, Marrakech pour les éléments majeurs et traces.

4. Résultats

4-1. Statistiques élémentaires

Cette étude a été basée sur 12 éléments traces analysés : Ag, As, B, Ba, Bi, Cd, Co, Cu, Mo, Pb, Sb, et Zn. La matrice de corrélation a été calculée (**Tableau 1**) dont seuls deux couples (Zn-Pb) et (Bi-Cd) présentent de bonnes corrélations. Le **Tableau 2** présente quelques statistiques élémentaires pour les éléments analysés (**Tableau 2**). Le sol analysé est essentiellement zincifère (**Figure 5a, b**). Les résultats des éléments analysés renferment des valeurs maximales relativement aux valeurs moyennes correspondantes pour chaque élément. Des histogrammes de fréquence des éléments du sol réalisés montrent le caractère unimodal homogène des résultats obtenus par une seule population (**Figure 6**). Les éléments analysés marquent une large plage de valeurs dont les valeurs extrêmes auront un impact sur l'interprétation des résultats obtenus par les méthodes classiques en se basant sur les valeurs moyennes. La représentation logarithmique des données brutes permet de réduire l'asymétrie de la distribution des populations de données, comme indiqué par les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement (**Tableau 2**). Cette méthode utilisée a permis de distinguer trois zones marquées par des points d'inflexions produites par le changement de pente de leur graphe (**Figure 7**). Le premier champ correspond au bruit de fond local, le second traduit l'étendue de la zone de transition, cependant le dernier illustre l'anomalie de l'élément analysé. Les valeurs élevées du bruit de fond du sol dans le secteur ont été attribuées au caractère minéralisé de la roche sédimentaire encaissante formant l'encaissant du gisement de Koudiat Aïcha, ainsi qu'au caractère mobile de certains éléments chimiques analysés du sol.

Tableau 1 : Matrice de corrélation des éléments traces analysés du sol de Koudiat Aïcha

	<i>B</i>	<i>Co</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>As</i>	<i>Cd</i>	<i>Mo</i>	<i>Ag</i>	<i>Sb</i>	<i>Ba</i>	<i>Pb</i>	<i>Bi</i>
<i>B</i>	1,00											
<i>Co</i>	-0,26	1,00										
<i>Cu</i>	-0,27	0,37	1,00									
<i>Zn</i>	-0,06	0,10	0,38	1,00								
<i>As</i>	-0,02	0,03	0,12	0,04	1,00							
<i>Cd</i>	-0,08	0,28	0,16	0,13	0,14	1,00						
<i>Mo</i>	0,02	0,09	0,07	0,04	0,03	0,17	1,00					
<i>Ag</i>	-0,05	-0,04	-0,02	-0,01	0,06	0,09	0,02	1,00				
<i>Sb</i>	0,00	0,08	0,01	-0,01	-0,07	0,05	0,03	0,05	1,00			
<i>Ba</i>	0,18	-0,21	0,11	0,06	0,06	-0,04	0,08	-0,04	-0,08	1,00		
<i>Pb</i>	0,25	0,01	0,13	0,50	0,06	0,27	0,08	0,01	-0,08	0,16	1,00	
<i>Bi</i>	-0,03	-0,05	-0,01	0,04	-0,06	0,46	0,09	0,06	0,24	-0,12	0,11	1,00

Tableau 2 : Statistique des éléments traces analysés du sol de Koudiat Aïcha

Eléments	Valeur Min (ppm).	Valeur Max (ppm).	Plage	Moyenne	Médiane	Mode	Écart -type	Variance de l'échantillon	Q1	Q3	Kurtosis (Coefficient d'aplatissement)	Coefficient d'asymétrie
<i>Ag</i>	0	30	30	0,63	0	0	2,67	7,11	0	0	52,51	6,56
<i>As</i>	0	230	230	22,94	19	0	25,80	665,61	0	31,1	14,58	2,73
<i>B</i>	0	101	101	20,93	20,1	0	14,81	219,26	0,34	20,1	0,94	0,62
<i>Ba</i>	79	3260	3181	482,4	478,5	493	179,35	32167,94	395	478,2	63,79	4,95
<i>Bi</i>	0	450	450	22,14	0	0	54,02	2918,57	0,00	25,6	22,53	4,39
<i>Cd</i>	0	33,1	33	11,96	11,7	4	4,67	21,81	0,5	11,7	0,91	0,35
<i>Co</i>	0	108	108	29,64	27	0	13,88	192,53	21,00	38	2,79	1,07
<i>Cu</i>	14,8	702	687,2	94,59	71,3	115	72,78	5296,80	53,45	113	19,38	3,50
<i>Mo</i>	0	82,9	82,9	6,35	8,01	0	5,96	35,54	0,00	10,5	24,00	2,07
<i>Pb</i>	6	832	826	92,11	88,	69	61,83	3822,82	49,00	126	36,26	3,78
<i>Sb</i>	0	64,7	64,7	0,58	0	0	3,93	15,42	0,00	0	121,90	10,21
<i>Zn</i>	28,1	3510	3482	193,36	147	125	188,03	35356,99	115	203,7	104,02	7,75

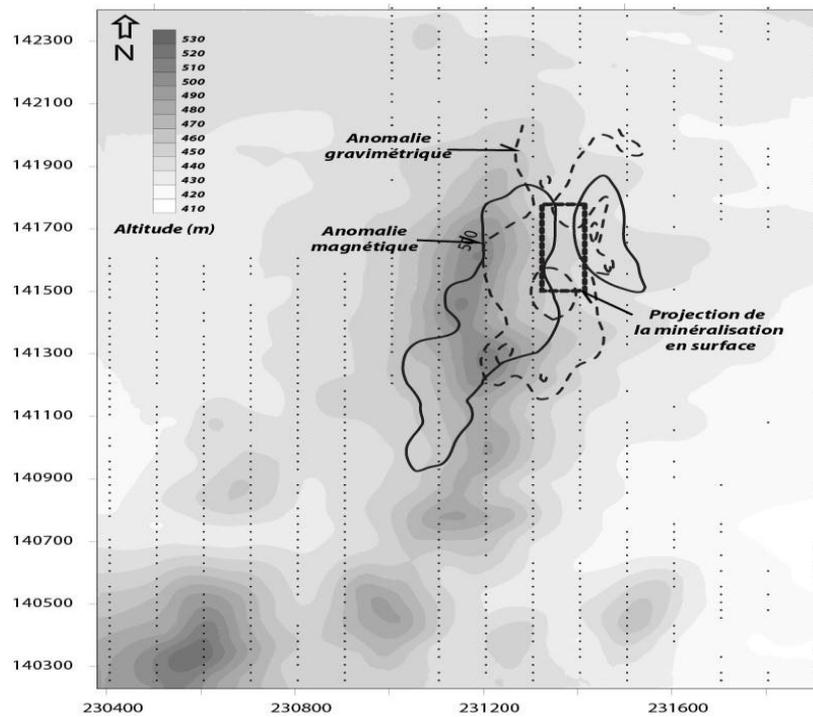


Figure 4 : Topographie et disposition de la grille de prospection géochimique du sol et des anomalies magnétiques et gravimétriques du secteur de Koudiat Aïcha

4-2. Cartographie et présentation des données des éléments chimiques

Sur la base des limites du bruit de fond, des cartes des isoteneurs de dispersion des couples Bi-Cd et Pb-Zn ont été tracées par la méthode de krigeage. Cette dernière présente la méthode optimale, au sens statistique du terme d'estimation. Elle peut être utilisée autant pour l'interpolation que pour l'extrapolation. Dans notre cas, nous nous restreindrons à l'interpolation et l'extrapolation spatiale en deux dimensions. Le bruit de fond a été éliminé de la présentation des données d'une part, d'autre part la zone de Koudiat Aïcha n'a connu aucune activité minière ou source de contamination récente au voisinage qui pourrait induire toutes causes de fausses anomalies probables. Les cartes des éléments As, Bi, Cd, Pb Sb et Zn contenus dans le sol ont été associées et reportées sur la **Figure 8**.

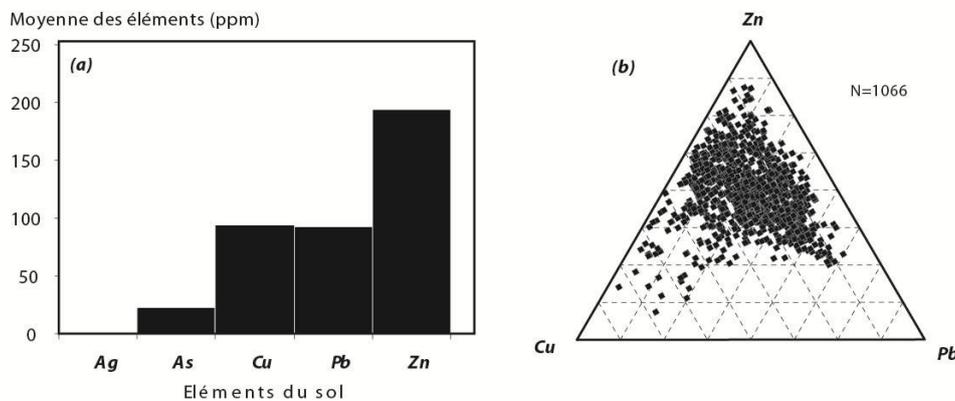


Figure 5 : (a) Histogramme de distribution moyenne des éléments recherchés du sol de Koudiat Aïcha. (b) diagramme ternaire Cu-Zn-Pb du sol

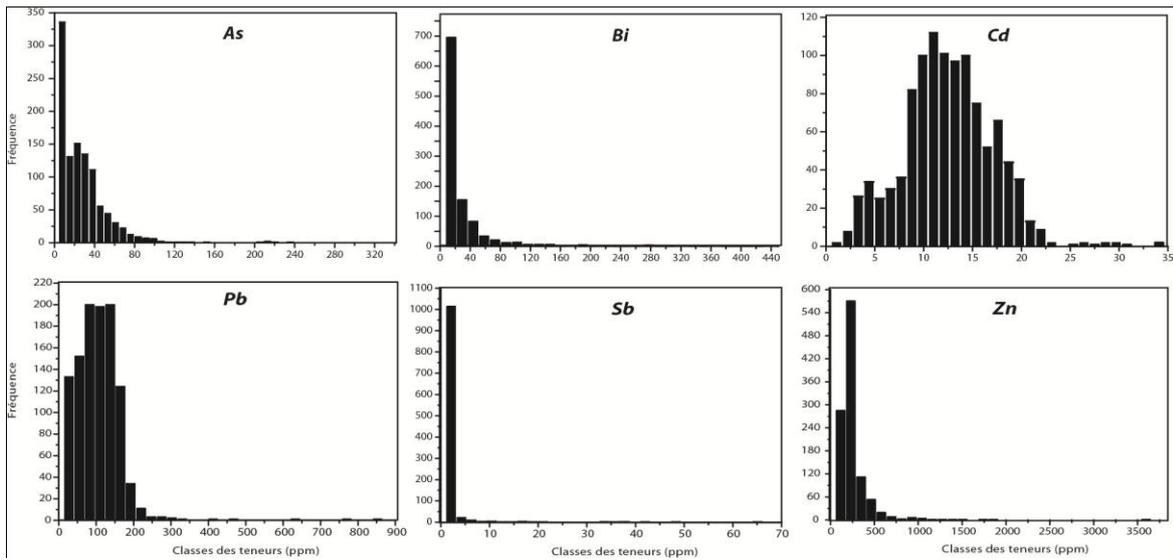


Figure 6 : Histogramme de fréquence des éléments du sol du secteur de Koudiat Aïcha

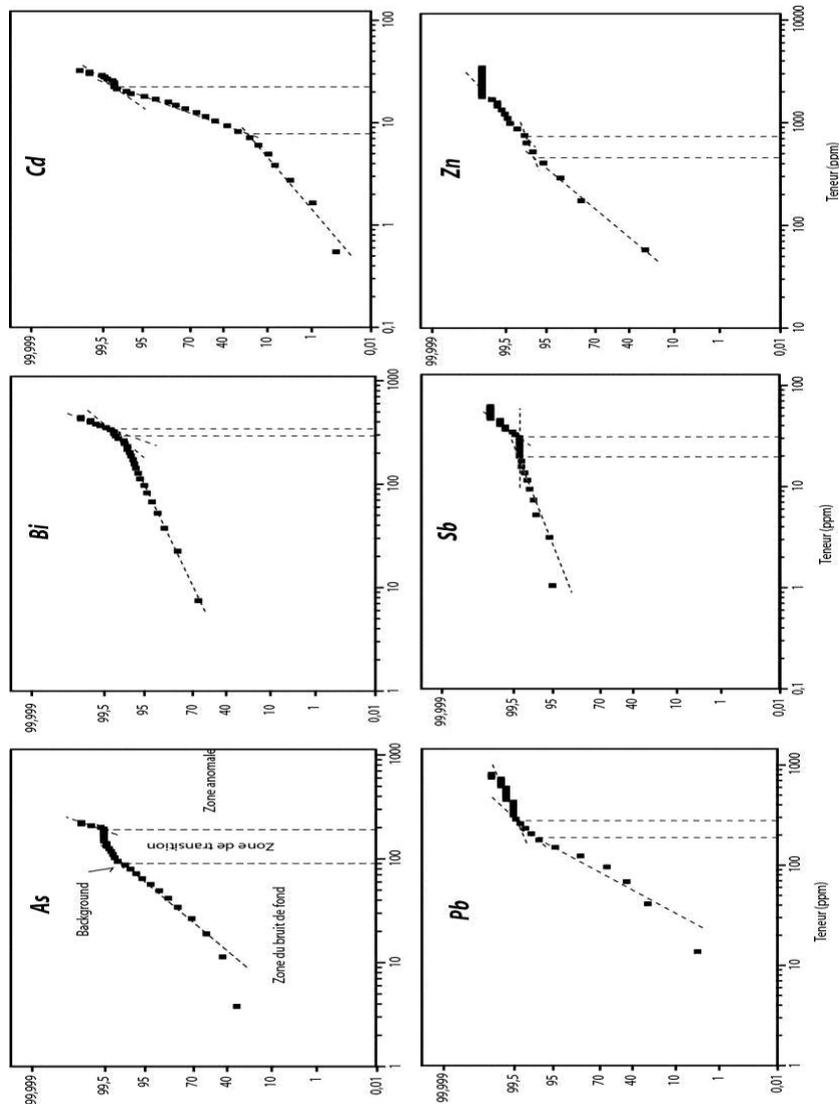


Figure 7 : Représentation graphique des fréquences cumulées des éléments du sol en fonction de leurs teneurs

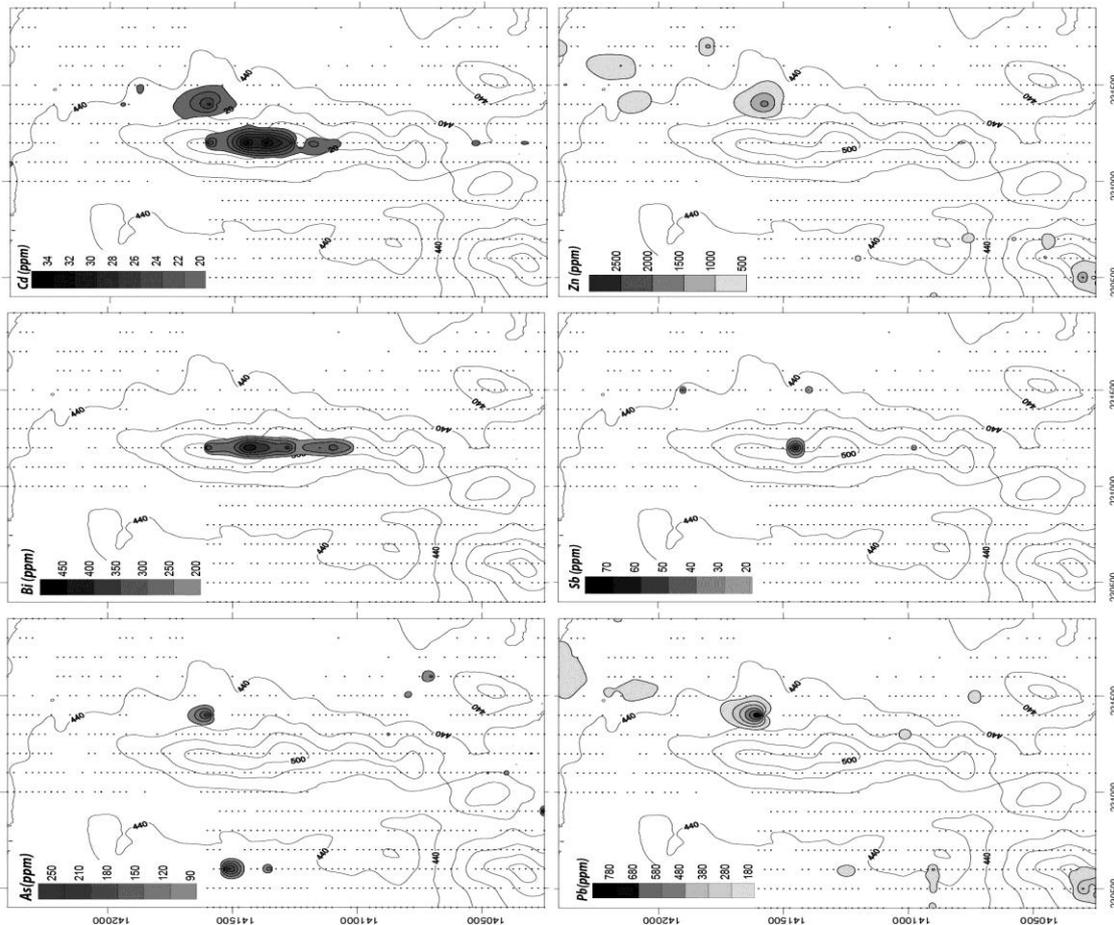


Figure 8 : Cartographie géochimique de la dispersion des éléments du sol analysés du secteur de Koudiat Aïcha

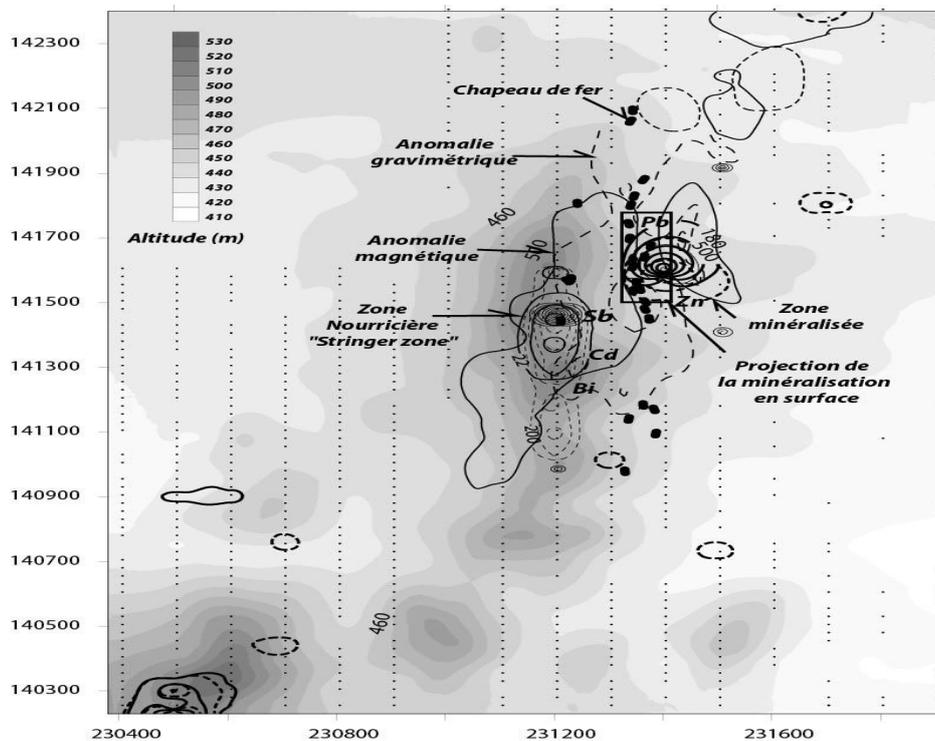


Figure 9 : Association des anomalies du Zn-Pb-Bi-Cd du sol du gisement de Koudiat Aïcha

5. Discussion

Le gisement de Koudiat Aïcha est encaissé dans la série viséenne du schiste de Saghlef couverte par un sol brut dont son analyse reflète la signature géochimique des roches sous-jacentes. Il est marqué à affleurement par la présence de chapeaux de fer [10], qui constituent les cibles pour l'exploration géochimique [11]. Le caractère unimodal homogène des résultats obtenus des éléments analysés du sol de Koudiat Aïcha illustré par une seule population, traduit l'appartenance de ces éléments chimiques au même événement minéralisateur, ainsi qu'à une seule source de métaux [2] (**Figure 6**). La représentation logarithmique des données a permis de délimiter la zone anormale par rapport à la zone de transition et celle du bruit de fond. Chaque élément chimique analysé présente un caractère unique pour cette distribution (**Figure 7**). Ce caractère peut être attribué à l'abondance de l'élément chimique en question dans la roche mère mais également à sa concentration suite aux événements liés aux fluides hydrothermaux responsable de la mise en place de la minéralisation sulfurée, ainsi qu'aux conditions de Eh-Ph du milieu et au degré de mobilité de l'élément après le dépôt. Les résultats des éléments analysés du sol du secteur du gisement de Koudiat Aïcha ont servi à tracer les cartes isotoneurs de dispersion des différents éléments (**Figure 8**) en tenant compte des valeurs locales du bruit de fond pour chaque élément analysé.

La forme ainsi que l'emplacement des anomalies du plomb et du zinc montrent leur parfaite superposition parallèlement aux tracés des chapeaux de fer (**Figure 8**). La projection du contour du corps minéralisé déduit à partir de la modélisation combinée des données géophysiques, magnétiques, et gravimétriques, coïncide parfaitement avec la zone à chapeau de fer le long d'axe NS et les anomalies produites par le Pb et le Zn (**Figure 2, 5**). Ces résultats permettent de considérer ces deux éléments comme étant de bons éléments indicateurs localisés à proximité de la minéralisation [4]. Les anomalies de bismuth et le cadmium tracent des anomalies superposées et bien localisées parallèlement par rapport à celles produites par le plomb et le zinc (**Figure 9**). Ces anomalies (Bi-Co) présentent la même direction NS que celle de Pb et du Zn, et montrent également la même étendue que celle du corps minéralisé. Les deux éléments (Bi-Cd) sont plus enrichis localement et ont été considérés comme de bons indicateurs des zones nourricières "stockworks" des gisements de sulfures massifs de la ceinture ibérique pyriteuse IPB [12]. Les zones nourricières matérialisent généralement la zone d'échange située à la base des corps minéralisés à sulfures massifs et qui contiennent les minerais à bismuth et de cobalt [12]. Ces deux éléments sont quasiment absents dans les minerais des sulfures massifs sus-jacents du gisement de Koudiat Aïcha.

Ceci a permis de mieux distinguer les veinules de sulfure appartenant aux zones de stockwork des gisements sulfures massifs et les veinules de nature ambiguë, et fournit des critères géochimiques de la proximité aux zones de stockwork liées au corps minéralisé. À partir de ces résultats, on déduit que les anomalies produites par le Pb et le Zn correspondent à l'anomalie produite par le corps minéralisé tandis que celle produite par le Bi et le Cd correspondent à la zone de stockwork du gisement de Koudiat Aïcha ayant été déformé et transposé sous l'effet de la déformation hercynienne le parallèlement à la zone minéralisée [13]. À ces deux éléments, les anomalies produites Sb et As, peuvent être ajoutés aux éléments indicateurs avec précaution au cours de l'interprétation des résultats. Cependant pour les autres éléments analysés tels que le Cu, Ag, B, Ba, Co, Mo, etc., ne montrent pas de bonne corrélation spatiale avec les anomalies produites par le Pb et le Zn au niveau de la zone minéralisée. Ces éléments sont marqués par une grande mobilité par rapport aux anomalies localisées produites par le Pb et le Zn dans les environnements semblables, et marquent une dispersion variable et ne peuvent pas être considérés comme éléments indicateurs dans le secteur du gisement de Koudiat Aïcha. Ces résultats peuvent être appliqués comme guide d'exploration autour des indices ferrugineux avoisinant le secteur de Koudiat Aïcha dans la province métallogénique des Jebilet centrales voire leurs extrapolations vers l'ensemble des terrains hercyniens marocains.

6. Conclusion

L'exploration actuelle est basée sur la combinaison des méthodes géophysiques et géochimiques ainsi que sur l'analyse des minéraux lourds et les terres rares du sol. Dans la présente étude du secteur du gisement de Koudiat Aïcha, l'exploration géochimique au sol a montré son importance et sa grande utilité à cibler et à localiser les potentialités métallifères encaissées en profondeur. Les anomalies géochimiques de sol produites par les éléments tels que le Zn et de Pb marquent bien leur proximité au gisement. Ces résultats ont été renforcées par les méthodes géophysiques (magnétiques, gravimétriques) et confirmées par les sondages carottés ayant intercepté en plus des unités lithologiques connues à l'affleurement le corps minéralisé en profondeur. Cependant, les anomalies de Bi et de Cd illustre bien la zone d'échange au dessous du corps minéralisé, et pourraient refléter l'appartenance des veines au même système hydrothermal ayant déposé le gisement en question. Malgré la très basse l'abondance des éléments de Bi-Cd dans le minerai [12], ces éléments pourraient être employés comme des éléments indicateurs au cours de l'exploration des minéralisations sulfurées similaires dans les Jebilet Centrales et Guemassa, voir son extrapolation vers l'ensemble des terrains hercynien.

Remerciements

Cet article fait partie des travaux de recherches entamés sur le gisement de Koudiat Aïcha en cours de développement. Je tiens à remercier particulièrement le PROTARS P23 / 05 (Programme thématique d'appui à la recherche scientifique), Reminex Exploration Company pour leur permission d'accès à leur zone de terrain, aux sondages carottés et aux données. Les examinateurs sont remerciés pour l'amélioration du manuscrit.

Références

- [1] - J. M. FRANKLIN, H. L. GIBSON, I. R. JONASSON and A. G. GALLEY, Volcanogenic Massive Sulphide Deposits : in Hedenquist, J. W., Thompson, J. F. H., Goldfarb, R. J., and Richards, J. P., eds., Economic Geology, 100th Anniversary Volume, *The Economic Geology Publishing Company*, (2005) 523 - 560
- [2] - F. LOTFI, S. BRUNET, "Implication de l'investigation géochimique du sol autour du dépôt polymétallique hercynien de Koudiat Aïcha Zn-Cu-Pb, Jebilet Centrales, Maroc", Actes de la 8^{ème} Edition du Colloque International " Magmatisme, Métamorphisme et Minéralisations Associées" les 8 au 12 Mai Marrakech, Maroc, (2013)
- [3] - F. LOTFI, "Utilisation des chapeaux de fer comme guide de prospection des amas sulfurés : cas du gisement polymétallique de Koudiat Aïcha, Jebilet Centrales Maroc", Actes de la 9^{ème} Edition du Colloque International " Magmatisme, Métamorphisme et Minéralisations Associées" Avril, les 2 au 4 Agadir & Taroudant, Maroc, (2015)
- [4] - E. ÇİFTÇİ, H. KOLAYLI, S. TOKEL, "Lead-arsenic soil geochemical study as an exploration guide over the Killik volcanogenic massive sulfide deposit, Northeastern Turkey", *Journal of Geochemical Exploration*, 86 (2005) 49 - 59
- [5] - A. A. LEVINSON, "Introduction to exploration geochemistry applied publishing Ltda", (1980) 600 p.
- [6] - P. HUVELIN, "Étude géologique et gîtologique du massif hercynien des Jebilet (Maroc occidental)", *Note et mém. Ser. Geol. Maroc* 232 bis, (1977) 307 p.
- [7] - BORDONARO, "Tectonique et pétrographie du district à pyrrhotine de Kettara (paléozoïque des Jebilet, Maroc)", Thèse 3^{ème} cycle, Université de Strasbourg France, (1983) 132 p.

- [8] - F. LOTFI, A. BELKABIR, A. C. BROWN, E. MARCOUX and S. BRUNET, "Geology and mineralogy of the Hercynian Koudiat Aïcha polymetallic (Zn, Pb, Cu) massive sulfide deposit, Central Jebilet, Morocco", *Exploration and Mining Geology*, Vol. 17, N° 3 - 4 (2008) 145 - 162 p.
- [9] - F. LOTFI, "Contexte géologique et minéralisation à sulfures massifs (Zn, Pb, Cu) du gisement hercynien de Koudiat Aïcha, Jebilet Centrales, Maroc", Ph.D. Thésis, Université Cadi Ayyad Marrakech, (2009) 180 p.
- [10] - A. HABIBEH et A. ALIJAN, "The geochemistry of gossans associated with Sarcheshmeh porphyry copper deposit, Rafsanjan, Kerman, Iran : Implications for exploration and the environment" *Journal of Geochemical Exploration*, 93 (2007) 47 - 65
- [11] - F. LOTFI, A. BELKABIR, A. C. BROWN, E. MARCOUX, S. BRUNET and L. MAACHA, "Geology and Mineralogy of the Hercynian Koudiat Aïcha Polymetallic (Zn-Pb-Cu) Massive Sulfide Deposit, Central Jebilet, Morocco", *Exploration and Mining Geology*, Vol. 17, No. 3 - 4 (2008)
- [12] - E. MARCOUX, Y. MOËLO and J. M. LEISTEL, "Bismuth and cobalt minerals as indicators of stringer zones to massive sulphide deposits, iberian pyrite belt", *Mineralium Deposita*, 31 (1-2) (1996) 1 - 26
- [13] - D. F. SANGSTER, "Precambrian volcanogenic massive sulphide deposits in Canada". A review. *Geological Survey of Canada*, 72 (1972) 22 - 43