

# **APPLICATION DES MÉTHODES GÉOCHIMIQUE ET GÉOPHYSIQUE (E.M-V.L.F) DANS LA RECHERCHE DES MINÉRALISATIONS POLY- MÉTALLIQUES DE TYPE PB-ZN-CU AU DJEBEL BOU ARIF (ALGÉRIE NORD-ORIENTALE)**

**Ramdane MARMI\* et Abdelkader BENAÏSSA\***

---

## **RÉSUMÉ**

Le Djebel Bou Arif, où se localise le secteur prospecté, se situe au nord du massif de l'Aurès. Il comprend des formations sédimentaires d'âge crétacé recouvertes en discordance par du Miocène marin. Les indices de minéralisations polymétalliques reconnus dans la région se localisent dans un encaissant carbonaté aptien.

Dans ce travail deux méthodes de prospection ont été utilisées sur une surface d'environ : 1 km<sup>2</sup> : les prospections géochimique et géophysique (électromagnétique V.L.F) . Elles ont permis de localiser des sites potentiellement minéralisés. La méthode EM- VLF a permis de mettre en évidence deux anomalies corrélables aux données géochimiques. Des associations géochimiques caractérisant les minéralisations plumbo-zincifère et cuprifère ont été dégagées.

Le traitement statistique multivariable sur les résultats des analyses chimiques nous a permis de fixer les fonds géochimiques se rapportant aux éléments Pb, Zn, Cu. dans un contexte carbonaté.

**Mots clés** - Géochimie - Géophysique Electromagnétic Very Low Frequency (EM – V.L.F) - Environnement carbonaté - Minéralisation polymétallique (Pb, Zn, Cu) -Bou – Arif- Algérie nord orientale.

## **GEOCHEMICAL AND GEOPHYSICAL (E.M – V.L.F) METHODS APPLIED FOR SEARCHING POLYMETALLIC MINERALIZATIONS (PB-ZN-CU) AT DJEBEL BOU ARIF (NORTH-EASTERN ALGERIA)**

### **ABSTRACT**

The prospected area is located at Djebel Bou Arif situated at the north of the Aurès massif. It represents a large anticlinal structure oriented NE-SW and composed by Cretaceous sedimentary unconformity formations. These formations are on marine Miocene cover.

The Cretaceous carbonate facies contains an abundant macro/microfauna. This allows give us to them a sedimentation environment of inner platform type ( Marmi, R. 1995).

---

\*Département de Géologie, Université de Constantine, Algérie  
- Manuscrit déposé le 04 Janvier 2000, accepté après révision le 03 Juin 2000.

In the studied area two directions of faults can be seen : NW – SE and E – W. The polymetallic mineralization indices are often found in a Cretaceous (Aptien) carbonate and linked up with these fractures.

These mineralizations are presented in the form of different morphologic bodies : metallic veins, columns, mass, lenses or traps ( pocket).

The main objectives of the present work are to characterize the trace elements distribution (mainly the Zn, Pb, Cu, As and Sb) in the carbonate medium and locate the geochemical anomalies.

Two methods of geochemical and geophysical (EM VLF) prospecting have been applied together in the same area, on a surface of about one square kilometer. In this case, the study consists also on testing the efficiency of two independant methods in carbonates medium to locate bodies containing sulphides.

The litho-geochemical prospecting according to a regular sampling grid following mesh of 50x20m, allowed us to gather 230 samples carried out by plasma - spectrometry. By means of statistical processing of geochemical data, we recognized geochemical associations as well as geochemical anomalies. The first association (Pb-Zn-As) is related to sulphides : Galena and sphalarite. The second association (Cu-Sb-As) characterizes grey copper with its two main minerals tenantite and tetrahedrite. The detected geochemical anomalies is linked up either with certain well determined facies or with fractures, which is in agreement with a mineralization control which is all together lithological and structural. The chemical element Arsenic (As) goes with the two types of mineralization, and it could therefore be taken as an indicator element for prospecting Cu-Pb-Zn mineralization.

The geophysical prospecting by the EM-VLF method has been chosen for several reasons : first as a rapid and low cost method, and secondary to make qualitative correlation with the geochemical method and finally to evaluate it's performance in locating such type of mineralization.

The EM-VLF method consists of measuring, at the Earth's surface, the distorsion of the electromagnetic field due to the presence of subsurface conducting bodies. As primary field one method uses the waves of low frequency emitted by the navigation station often of several thousands of kilometers far. The problem is to measure the phase component (I) and the quadrature component (Q) of the vertical electromagnetic field induced in the subsurface. The depth of investigation of this method is about 40 meters. By choosing the navigation station F.U.O (emission waves of 15.1 KHz – Bordeaux) for it's better signal, we have oriented the survey profiles in the N145°E direction, almost perpendicular to the known mineralized structures in the region. The survey profiles are separated by a constant distance of 20 m. The regular measuring step was also chosen to be 20 m.

The processing of geophysical data and their graphical illustrations (derived curves and anomalous map) show evident correlation with the geochemical anomalies.

**Key-words** - Geochemistry - Geophysic Electromagnetic Very Low Frequency (EM-VLF) - Carbonate medium - Polymetallic mineralization (Pb-Zn-Cu) - Bou Arif - Eastern Algeria.

## I - INTRODUCTION

Au Djebel Bou Arif des indices de minéralisation polymétallique sont visibles à l'affleurement.

Des traces de minéraux secondaires de cuivre (azurite et malachite) décelés au cours d'un levé géologique nous ont permis de retenir le secteur Est (sur une superficie d'environ un kilomètre carré) pour une étude plus détaillée par la prospection lithogéochimique.

Cette prospection vise un double objectif :

- définir le fond géochimique local "dans un contexte carbonaté",
- localiser les structures minéralisées non affleurantes.

Une fois les premiers résultats obtenus, nous chercherons "à les confirmer" par la méthode géophysique (électromagnétique - V.L.F.). Cette méthode est connue par son efficacité dans la recherche de minerais polymétalliques de faible profondeur. De plus son choix est justifié par sa rapidité d'exécution et pour son moindre coût.

Après un bref rappel sur le contexte géologique, nous exposerons la méthodologie suivie et les résultats obtenus.

## II - CADRE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE

Le Djebel Bou Arif fait partie de la frange nord de l'Aurès. Il est situé à une trentaine de kilomètres au NE de la ville Batna (fig.1). Le secteur d'étude se caractérise essentiellement par des roches carbonatées aptiennes. Cependant trois types de faciès se distinguent : les calcaires, les dolomies et les grès.

Les calcaires en bancs métriques sont affectés par des microfractures à remplissage calcitique. Ils contiennent une macrofaune caractéristique d'un milieu de sédimentation peu profond.

Les dolomies sont légèrement gréseuses particulièrement dans le Nord du secteur d'étude. Elles contiennent des minéraux accessoires ferrifères.

Les grès sont à grains fins. Ils constituent des bancs minces, centimétriques à décimétriques, intercalés de joints marneux. Ces bancs comportent des traces de rides de courants.

Deux phénomènes d'altération secondaire, dolomitisation et silicification, affectent parfois certains faciès carbonatés.

Le milieu de sédimentation est peu profond à haute énergie de type plate-forme interne (Marmi, 1995).

Deux directions principales de fractures sont visibles : NW - SE et E - W (fig.1)

## III - LA PROSPECTION LITHOGEOCHIMIQUE

Nous avons procédé à un échantillonnage systématique des roches en surface suivant une maille régulière 50 m x 20 m et 230 échantillons ont ainsi été récoltés. Ils sont soumis à une analyse chimique multi-élémentaire par torche à plasma. Les résultats obtenus ont subi un traitement statistique. Ce traitement est effectué afin de déterminer les différents paramètres des éléments traces : As; Ba; Cd; Cu; Fe; Mn; Pb; Sb; Sr; et Zn. Ce groupe d'éléments correspond au cortège géochimique typique des minéralisations polymétalliques recherchées.

### a - Traitement univarié

Le profil P10 (fig. 1) pris en considération est représentatif du terrain d'étude. Il recoupe l'ensemble des faciès et structures géologiques et est orienté globalement N-S.

La visualisation des résultats se rapportant à ce profil permet (fig. 2) :

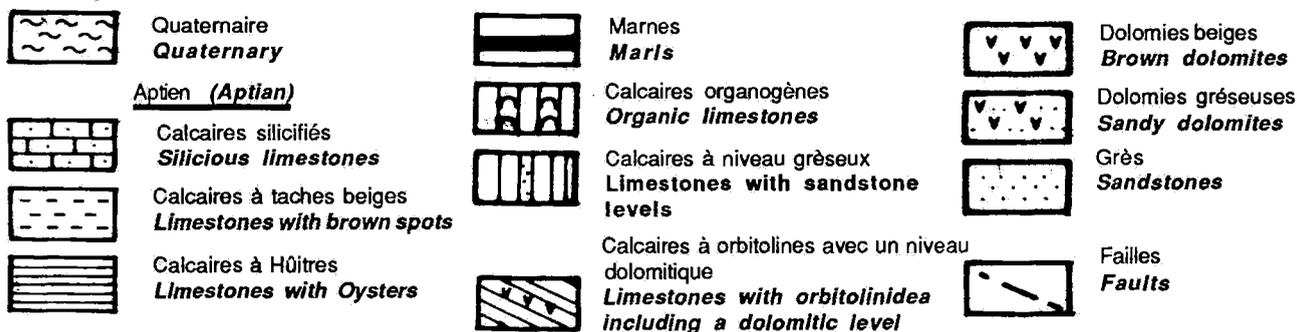
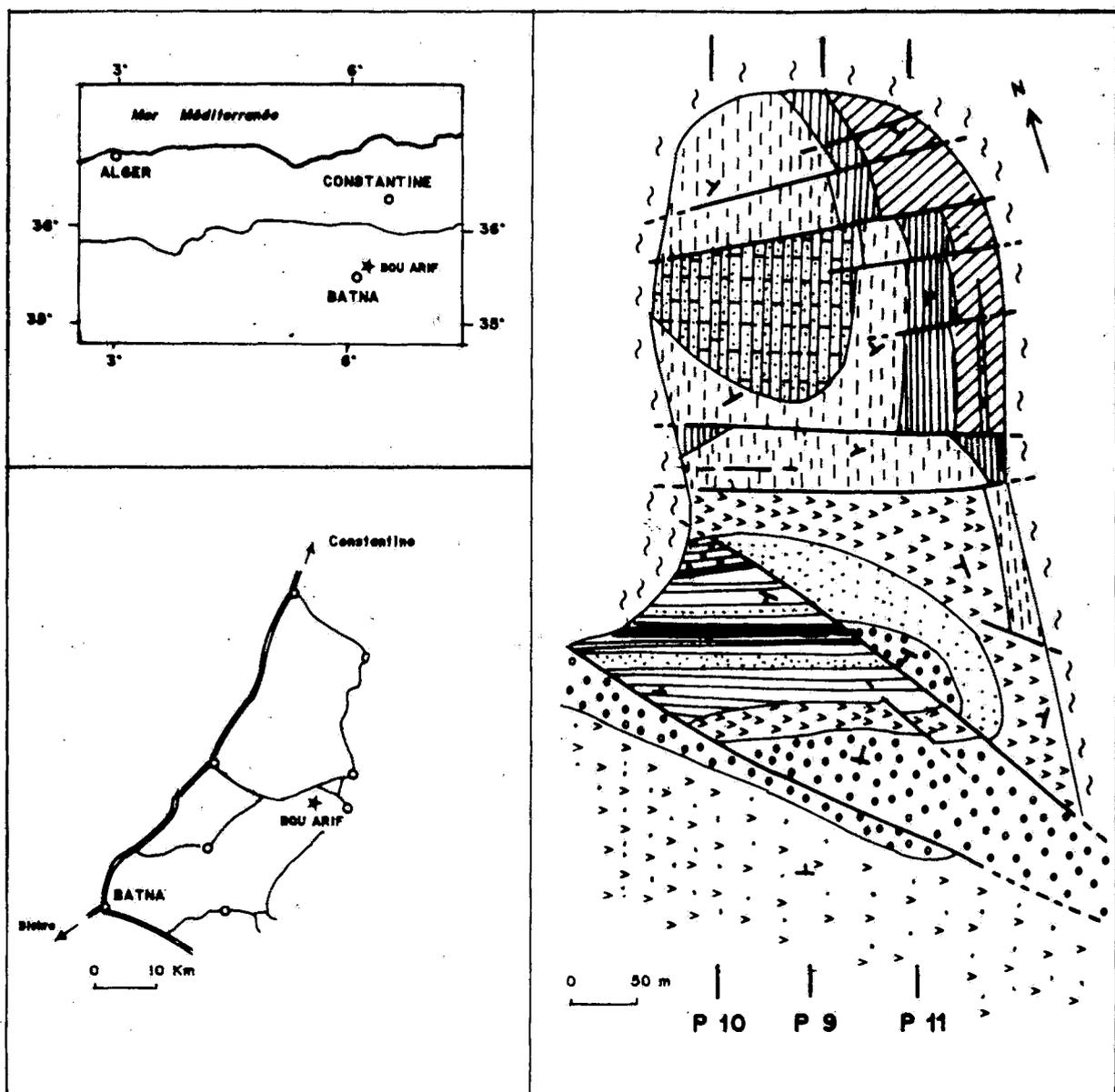
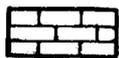
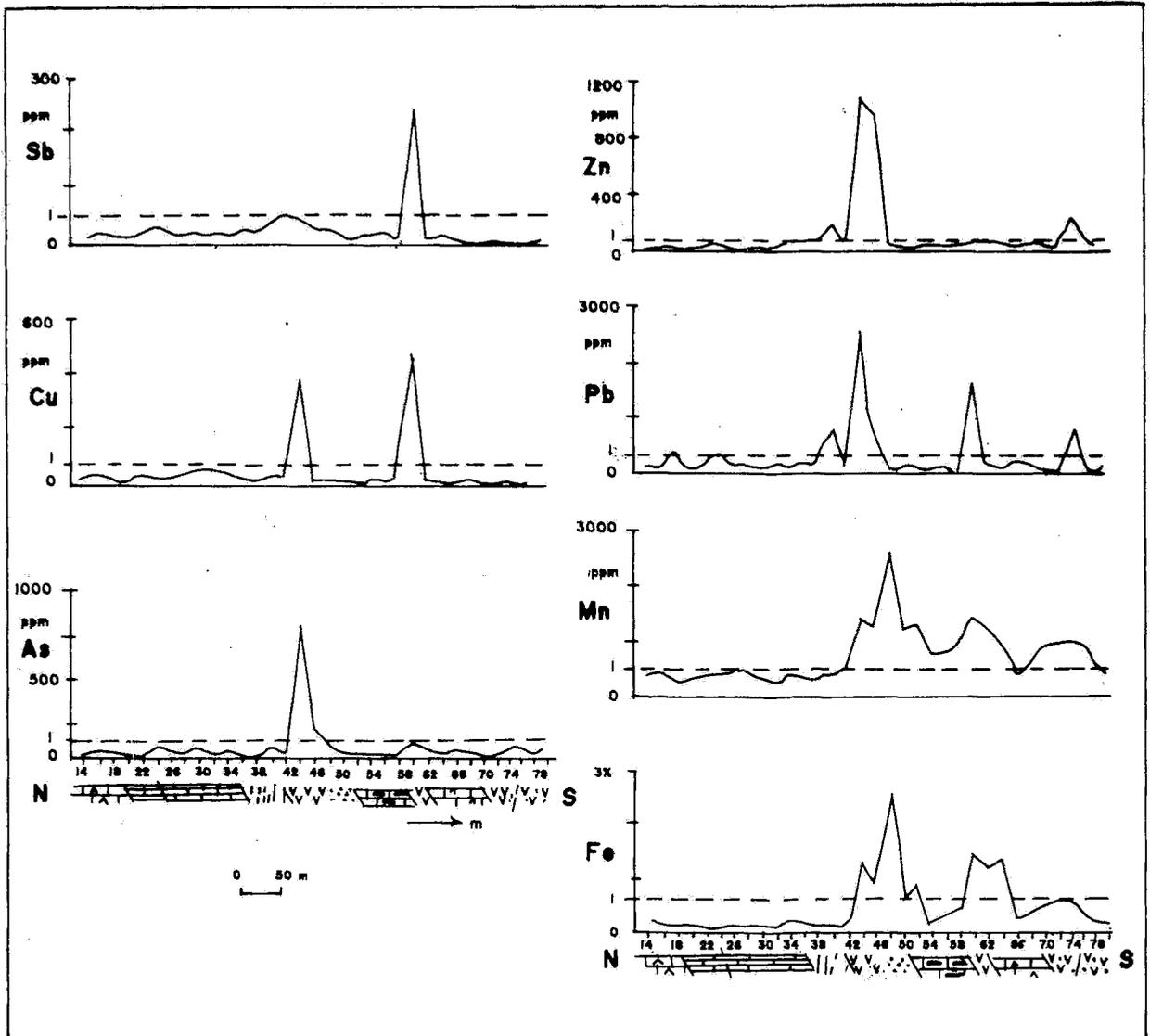


Fig. 1 - localisation et carte géologique détaillée du terrain d'étude  
*Location and detailed geological map of the studied area*



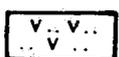
Calcaires à taches beiges  
*Limestones with brown spots*



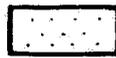
Calcaires à Hûîtres  
*Limestones with Oysters*



Dolomies beiges  
*Brown dolomites*



Dolomies gréseuses  
*Sandy dolomites*



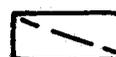
Grès  
*Sandstones*



Calcaires mameux  
*Marly limestones*



Calcaire à orbitolines  
*Limestones with orbitolinidea*



Failles  
*Faults*

Fig. 2 - Profils lithogéochimiques  
*Lithogeochemistry profiles*

- de localiser les anomalies en relation avec les minéralisations et de les distinguer de celles apparentes, liées à la nature de la roche,
- de repérer l'interdépendance des éléments (éléments corrélables).

Cette visualisation a permis également de remarquer les relations suivantes :

- Pb, Zn : l'analyse des variations des teneurs de ces éléments montre que le Pb suit l'allure décrite par le Zn. La répartition de ces deux éléments est surtout liée aux faciès dolomitiques et parfois elle est contrôlée par la tectonique. Leurs teneurs respectives dépassent les 1 000 ppm et 800 ppm.
- Cu, AS, Sb : sont généralement rattachés aux calcaires dolomitiques et/ou silicifiés affectés par des fractures. Les teneurs qui dépassent de loin leurs seuils d'anomalies sont associées plus particulièrement aux faciès silicifiés. Leurs teneurs respectives sont supérieures à 200 ppm, 500 ppm et 100 ppm.

Fe, Mn : ces deux éléments covarient et sont étroitement liés. Leurs hautes teneurs sont associées au calcaire dolomitique beige dont le microfaciès représente une ferrodolospélite et à un niveau gréseux ferrugineux. Leurs teneurs respectives dépassent les 2% et 1 000 ppm.

#### *a.1- Courbes de probabilité*

L'étude statistique d'une population consiste à rechercher le type de distribution auquel elle obéit. En géochimie on restreint généralement ce choix à l'alternative distribution normale ou distribution log-normale (Dejonghe, 1985). Les courbes de probabilité, des éléments traces pris en considération, sont établies en faisant référence aux travaux de Lepeltier, (1969) et Sinclair, (1976, 1986).

L'étude des distributions des fréquences montre que les populations se rapportant aux éléments : As, Cu, Fe, Pb sont de type bimodal.

La figure 3a illustre cela pour le Pb. Par contre celles des variables Ba, Mn, et Zn sont de type polymodal. La figure 3b en est un exemple pour Zn. Le seuil d'anomalie ( $t$ ) est évalué pour chaque composante en utilisant la relation :  $t = \bar{x}_m + 2\sigma$  (Bolle, 1981).

Avec

- $t$  : seuil d'anomalie estimé graphiquement à 97 %;
- $\bar{x}_m$  : moyenne arithmétique des valeurs logarithmiques;
- $\sigma$  : déviation standard ou écart type.

#### *a.2 - Carte géochimique synthétique*

La figure 4 montre une synthèse des cartes géochimiques établies pour les éléments principaux (Cu, Pb, Zn, As et Sb).

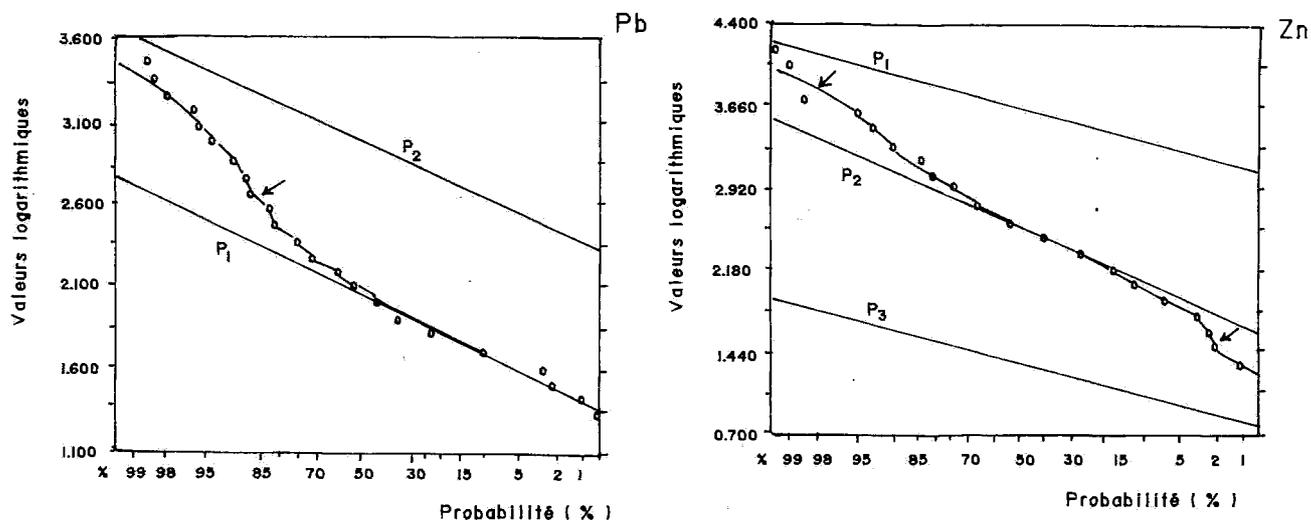
Les deux types de minéralisations, cuprifère et plombo-zincifère, sont :

- Soit superposées géographiquement (au sud du secteur d'étude) soulignant une importante anomalie géochimique qui regroupe les deux types de minéralisations (cuprifère et plombo-zincifère). Cette dernière se manifeste au-dessus des faciès recoupés par la faille décrochante senestre (F1) de direction NW - SE.
- Soit isolées dans l'espace. Au nord la minéralisation cuprifère (Cu - Sb) est rattachée aux calcaires silicifiés. Dans la zone médiane la minéralisation, surtout plombo-zincifère, est plutôt en relation avec la fracture de direction globale E - W.

Cependant l'élément chimique As accompagne les deux types de minéralisations.

#### **b) Traitement multivariable**

Ce type de traitement, réalisé automatiquement, nous a permis de déterminer les paramètres de distribution de chaque élément trace (tableau ci-dessous).

a - Plomb (*Lead*)b - Zinc (*Zinc*)

Variable : **Pb**  
 Unité : ppm (valeurs logarithmiques)  
 N : 230

Populations

Pop	Moy	Dev. stad	%
1	2.0439	0.2834	85%
2	2.9792	0.2670	15%

Seuils d'anomalie (*Thresholds*)

Pop	Seuils d'anomalie	
1	1.4771	2.6107
2	2.4453	3.5131

Variable : **Zn**  
 Unité : ppm (valeurs logarithmiques)  
 N : 230

Populations

Pop	Moy	Dev. stad	%
1	1.3343	0.2183	2%
2	2.5671	0.3862	90%
3	3.6418	0.2313	8%

Seuils d'anomalie (*Thresholds*)

Pop	Seuils d'anomalie	
1	0.7886	1.8800
2	1.6017	3.5325
3	3.0636	4.2200

Fig. 3 - Courbes de probabilité  
*Probability curves*

Paramètres	As	Ba	Cu	Fe	Mn	Pb	Sb	Zn
Background	51	399	4	0.56	553	106	39	369
$\bar{x}_m$	66	426	11	1	660	153	50	436
$\sigma$	2	4	8	1	3	3	2	3.5
Seuil (t)	156	1500	59	1	1300	326	61	3000
Coeff. Var.	19	22	88	886	14	20	18	20

*Fe en pour-cent et le reste des éléments en ppm*

Les coefficients de corrélation calculés entre les différents couples de variables sont les suivants :

Fe-Mn	Zn-As	Zn-Pb	As-Sb	Cu-As	Pb-As	As-Ba	Cu-Sb	Cu-Ba
0.726	0.593	0.741	0.827	0.757	0.703	0.574	0.791	0.571

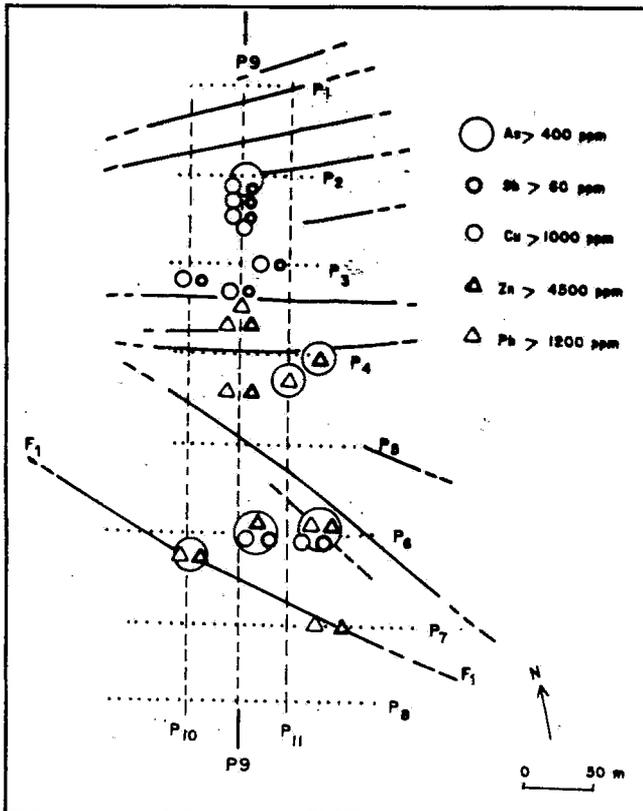


Fig. 4 - Carte géochimique synthétique  
*Synthesis geochemical map*

Les fortes corrélations caractérisant certains couples d'éléments, permettent de dégager les associations géochimiques suivantes : Cu-Sb-As, Pb-Zn-As. La première indique une minéralisation cuprifère correspondant au cuivre gris, regroupant à son tour deux minéraux caractéristiques : tenantite et tétraédrite renfermant respectivement As et Sb. La deuxième caractérise plutôt une minéralisation plombo-zincifère représentée par les minéraux : galène et sphalérite.

#### IV - LA PROSPECTION GEOPHYSIQUE (ELECTROMAGNETIQUE V.L.F)

##### a - Rappel théorique

La prospection électromagnétique V.L.F utilise comme champ primaire des signaux radio (15 à 25 kHz), émis par de puissantes stations, destinés à la navigation maritime. L'éloignement

des émetteurs (quelques centaines à quelques milliers de kilomètres) permet d'assimiler l'onde reçue à une onde plane, composée d'un champ électrique et d'un champ magnétique.

En prospection géophysique, il est d'usage de s'intéresser aux variations du champ magnétique. En effet, la présence d'un conducteur se manifeste par un champ secondaire (induit). Ce champ vient s'ajouter au champ primaire  $H_{y0}$  avec un retard de phase  $DF$  d'où l'apparition d'une composante magnétique verticale  $H_z$ . Le champ magnétique ( $H_y, H_z$ ) décrira alors, dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation, une ellipse dite de "polarisation". Les paramètres de cette ellipse sont (Smith, and Ward, 1974) :

- L'inclinaison  $a$  : Elle est pratiquement proportionnelle à la composante réelle ( $I$ ) du champ secondaire mesuré dans le plan vertical.

- L'excentricité  $e$  : Elle est directement proportionnelle à la composante en quadrature ( $Q$ ) du champ secondaire (Paterson, and Ronka, 1971).

Les mesures de l'inclinaison  $\alpha$  (en fait de  $tg2\alpha$ ) et  $e$  peuvent être utilisées pour représenter les deux composantes du champ secondaire avec une précision suffisante pour la prospection géophysique.

##### b - Mise en œuvre

Plusieurs appareils canadiens mettent en œuvre les relations précédentes dans leur conception. Nous présentons ici les résultats obtenus avec le "EM 16 GEONICS". (avec cet appareil les mesures de  $I$  et  $Q$  sont données en %).

Les profils géophysiques sont orientés suivant une direction N 145°E, presque perpendiculairement à la direction des fractures minéralisées reconnues dans la région. Les mesures sont prises suivant une maille de 20 m x 20 m. La station émettrice FUO 15.1 kHz (située à

Bordeaux-France-) a été choisie pour son meilleur signal (c'est à dire avec une ligne tellurique perpendiculaire à la structure et donc dans le sens du profilage).

### c - Exploitation des mesures

La méthode électromagnétique V.L.F. est une méthode intégrante. Les résultats doivent donc être soumis au préalable à un filtrage. Fraser, (1969) a développé une technique assez simple qui consiste à utiliser la relation suivante:

$$I'_{23} = (I_4 + I_3) - (I_2 + I_1)$$

Où  $I_1, I_2, I_3, I_4$  sont les valeurs successives mesurées sur le profil. La valeur ainsi trouvée, qui représente "la dérivée" de  $I$ , est reportée au milieu des stations 2 et 3.

Ce traitement est appliqué à la composante réelle ( $I$ ) mesurée sur le terrain et le résultat obtenu a servi à l'établissement de la carte d'anomalie lissée.

#### c.1 - Carte d'anomalie lissée (fig. 5)

Les anomalies mises en évidence sont bien individualisées : négatives et positives. Ces dernières correspondent généralement à des zones conductrices donc minéralisées.

Une anomalie positive importante (amplitude + 80%) se localise au sud de la zone d'étude et se manifeste au-dessus des calcaires dolomitiques beiges à proximité d'une fracture orientée NW - SE bien visible en surface.

Plus au nord une anomalie d'une amplitude de +60% et de faible étendue se trouve au dessus des calcaires silicifiés qui comportent des traces d'une minéralisation cuprifère visible à l'affleurement (malachite et azurite). Cette anomalie est, par ailleurs, bien exprimée par la cartographie géochimique.

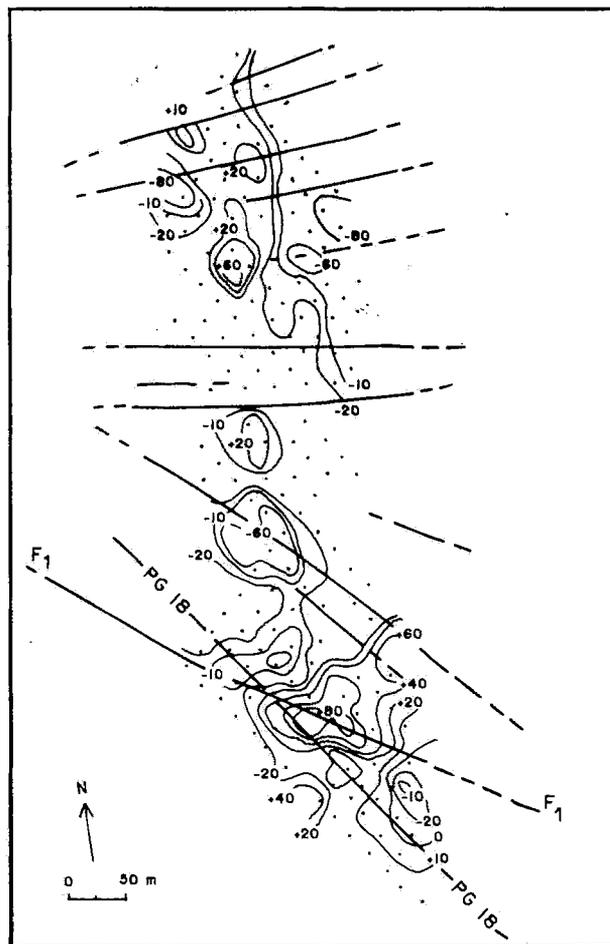


Fig. 5 - Carte isanomale EM-V.L.F. (angle d'inclinaison - lissée - émetteur F.U.O)

**Anomalous map EM-V.L.F. (tilt angle - smoothed - F.U.O station)**

#### c.2 - Profils géophysiques

Nous avons également tenté une interprétation "quantitative" (estimation de la profondeur du corps conducteur). Cette interprétation est souvent complexe mais dans le cas où la profondeur de l'objectif est faible (une vingtaine de mètres) l'usage des abaques de terrains édités par Kaikkonen (1980), est possible. Pour cela la figure 6 illustre, comme exemple, le profil PG 18 qui recoupe l'anomalie principale située au sud du secteur prospecté. Cette interprétation montre une minéralisation peu profonde (environ 10 m) avec un faible pendage vers le NW.

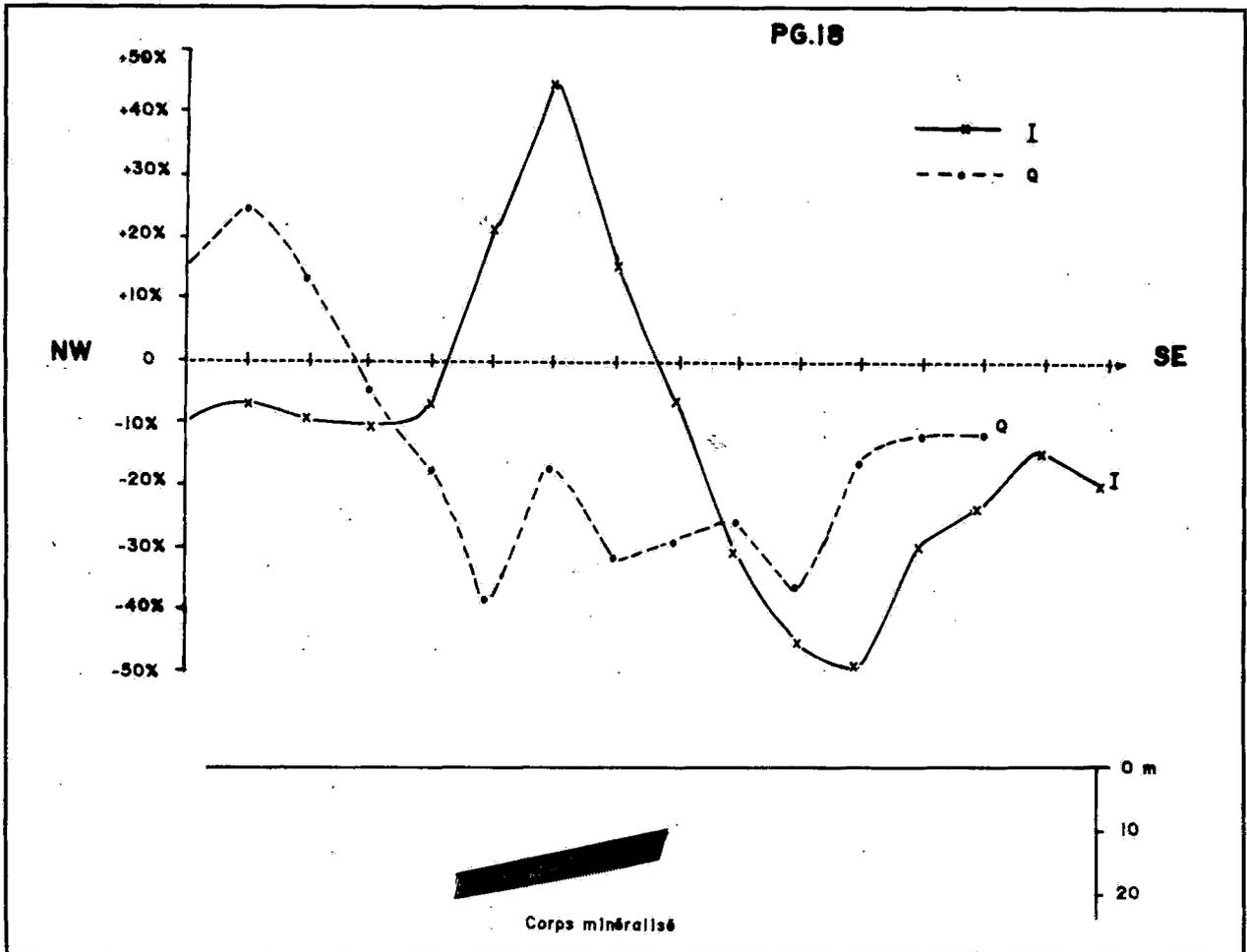


Fig. 6 - Profil géophysique PG18 - V.L.F. (I,Q)  
 Geophysical profil PG18 - V.L.F. (I,Q)

## V - CONCLUSION

Le traitement statistique des résultats des analyses chimiques a permis de fixer le fond géochimique local pour les éléments principaux (Cu, Pb, Zn) se rapportant à la minéralisation polymétallique.

La cartographie géochimique et l'analyse des profils lithogéochimiques, montrent un contrôle lithostructural de cette minéralisation. Elles ont également permis de localiser les sites géochimiques anormaux et de dégager les principales associations géochimiques repérées par corrélations inter-élémentaires. Les deux miné-

ralisations Pb-Zn (galène- blende) et Cu-Sb-As (cuivre gris) sont souvent accompagnées par des minéraux secondaires respectifs : cérusite-anglésite-hémimorphite-smithsonite et azurite-malachite. L'élément trace représenté par l'As constitue un bon guide (élément indicateur) pour rechercher la minéralisation Pb-Zn-Cu associée à un contexte carbonaté.

La géophysique a mis en évidence deux anomalies significatives : une anomalie, au nord du secteur d'étude, de faible extension et une au sud plus étendue. Ces deux anomalies sont corrélables à celle décelées par la géochimie. La

faible extension de "l'anomalie géophysique nord" peut s'expliquer soit par une faible minéralisation soit par un corps profond impliquant un signal plus faible.

Ainsi la méthode V.L.F, par la légèreté de son équipement et la rapidité de sa mise en œuvre, peut fournir une première approche qui orientera la prospection géochimique ou toute autre méthode (plus lourde) sur les secteurs prometteurs pour la recherche minière.

### BIBLIOGRAPHIE

- BOLLE, J.N., 1981.** Etude géochimique et radiométrique d'un niveau de schistes noirs du Revinien supérieur au bord sud du massif de Stavelot. *Mémoire de licence en géologie et minéralogie* (Univ. Cath. Louvain - La - Neuve), 173 p.
- DEJONGHE, L., 1985.** Contribution à l'étude métallogénique du synclinorium de Verviers (Belgique). *Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences en Géologie*, Paris 6, 389 p.
- FRASER, D.C., 1969.** Contouring of VLF-EM data, *Geophysics* 28, 960-968.
- KAIKKONEN, P., 1980.** Interpretation Nomograms for VLF measurements, *Acta Univ. Oul.* A 92, Phys. 17 - 48.
- LEPELTIER, C., 1969.** A simplified statistical treatment of geochemical data by graphical representation. *Econ. Geol.*, Vol. 64, 338-550.
- MARMI, R., 1995.** Les bassins continentaux de l'avant-pays de la chaîne alpine d'Algérie nord-orientale. Etudes stratigraphique, sédimentaire, structurale et géochimique. *Thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré*, Nancy I, 245 p.
- PATERSON, N. R. AND RONKA, V., 1971.** Five years of surveying with Very Low Frequency-Electromagnetic method, *Geoexploration* 9, 7-26.
- SINCLAIR, J., 1976.** Application of probability graphs in mineral exploration. In the Association of Exploration Geochimists, *Special Vol. n°4*, 95 pp.
- SINCLAIR, J., 1986.** Statistical interpretation of soil geochemical data. In *Economic Geology and the Bulletin of Society of Economic Geologists*. Vol. 82, N°3 ;97-195.
- SMITH, B.D. AND WARD, S. H., 1974.** On the computation of polarization Ellipse Parameters, *Geophysics* 39, 867-869