

# **Essais méthodologiques de biogéochimie sur le gisement cuivre - polymétallique de Boukaïs (Algérie)**

**Abderrahmane HENNI**

\* Office National de la Recherche Géologique et Minière,  
*B.P. 102 Boumerdès*

**Résumé :** L'exploration minière se voit, de plus en plus, confrontée à la recherche de gisements cachés nécessitant une approche nouvelle à laquelle la biogéochimie doit largement contribuer.

La prospection biogéochimique de minéralisations subaffleurantes ou masquées par la couverture végétale a connu des améliorations sensibles, surtout par l'analyse des spécificités de la composante végétale du signal biogéochimique.

Les premiers essais méthodologiques de biogéochimie réalisés sur le gisement cuivre-polymétallique de Boukais ont permis de dégager certaines corrélations dans la distribution des éléments minéraux dans les plantes et les minerais sous-jacents.

Des recommandations ont été élaborées pour la conduite des travaux de prospection biogéochimique de minéralisations cuivre - polymétalliques analogues à celles de Boukais.

**Mots clés :** Biogéochimie - Prospection biogéochimique - Minéralisation cuivre - polymétallique - Plantes - Végétation - Géobotanique.

## **Methodological biogeochemical tests over the copper - polymetallic deposit of Boukaïs (Algeria)**

**Abstract :** The mining exploration is becoming more and more confronted to the investigation of hidden fields requiring a new approach to which the biogeochemistry must widely contribute.

The biogeochemical prospection of subsurface out or masked mineralization by the vegetal cover has given good improvements, especially by the analyses of specificities of the plant component of the biogeochemical signal.

The first methodological tests of biogeochemistry realised on the polymetallic copper fields of Boukais have allowed to evolve certain correlations in the distribution of mineral elements in the plants and the subjacent ores.

Recommendations have been elaborated for the work on the biogeochemical prospection of polymetallic copper mineralization analogous to those of Boukais

**Key-words:** Biogeochemistry - Biogeochemical prospection - Polymetallic copper - mineralization - Plants - Vegetation - Geobotanical.

## I - INTRODUCTION

Le but essentiel de ce premier travail expérimental de biogéochimie réalisé sur le gisement cuivre-polymétallique de Boukaïs, réside dans une analyse détaillée des végétaux prélevés en surface des zones minéralisées et la définition de leurs relations éventuelles avec le minerai et son encaissant sous-jacent.

Il faut souligner que la plupart des gisements métallifères affleurants ont été déjà découverts et exploités. La recherche de cibles en profondeur ou masquées par la végétation nécessite l'utilisation de nouvelles méthodes et techniques plus adaptées à ce type de prospection.

Les méthodes biogéochimiques de prospection sont conçues pour mener des investigations qualitatives et quantitatives sur la végétation et la mise en évidence d'anomalies géochimiques indicatrices de minéralisation en profondeur.

La prospection biogéochimique de la végétation est d'usage courant dans plusieurs pays (CEI, Canada, USA, certaines régions d'Afrique).

Un exemple d'application, à *posteriori*, c'est-à-dire sur un indice d'uranium déjà détecté par radiométrie, a été pratiqué sur des aiguilles de pin, sur la bruyère et le ciste dans l'Estérel en France.

L'analyse des traces métalliques contenues dans une tourbe peut aussi conduire à la découverte de gisements sous-jacents ; ce fut le cas pour le gisement de Cu, Pb, Zn, d'Oulu en Finlande (Salmi, 1956).

La *Viola calaminaria* des anciens mineurs sardes, qui se développe sur des affleurements zincifères oxydés, est un vieil exemple de plante indicatrice.

Les soviétiques ont signalé une plante indicatrice du cuivre, *Gypsophila patrini*, en Asie

Centrale, et ils ont prospecté les borates par l'inventaire des plantes.

Sur le plateau du Colorado, on a pu prospecter l'uranium grâce à une espèce d'Astragale, très avide de sélénium, accompagnateur de l'uranium. La Prêle : *Equisetum arvense* et d'autres espèces peuvent contenir jusqu'à 150 grammes d'or par tonne, et on a même suggéré d'en tirer une méthode d'exploitation de l'or (Rankama, 1947).

Dans les régions cuprifères du Katanga, on a pu introduire la notion de « bitope métallifère » (Duvigneaud, 1958).

Les travaux réalisés par H. V. Warren et G. H. Howatson (1947), H. V. Warren et R. E. Delavault (1955), M. L. Cannon (1955, 1960), K. K. Ramkama (1947), J. S. Webb et A. P. Millman (1951), D. P. Maliouga (1963) et autres, ont largement contribué au développement des méthodes biogéochimiques avec des exemples pratiques de prospection biogéochimique de l'or, du cuivre, des polymétaux...

## II - CADRE GEOLOGIQUE REGIONAL

La structure de la région de Boukaïs appartient aux affleurements du Protérozoïque supérieur au Nord-Ouest de la chaîne d'Ougarta. Cette dernière occupe une position particulière au sein de la plateforme africaine. Elle est constituée de deux étages structuraux principaux mis en place au cours des deux cycles orogéniques panafricain et hercynien. Le socle protérozoïque apparaît à la faveur des boutonnières d'érosion de Boukaïs et dans la chaîne d'Ougarta (Damrane, Guettara ...).

## III - CADRE GEOLOGIQUE DU GISEMENT

Le massif de Boukaïs est situé à 50 Km au Nord-Ouest de la ville de Béchar (fig. 1). Il apparaît sous forme de boutonnière anticlinale. Il est

ESSAIS MÉTHODOLOGIQUES DE BIOGÉOCHIMIE SUR LE GISEMENT CUIVRE - POLYMÉTALLIQUE DE BOUKAIS (ALGÉRIE)

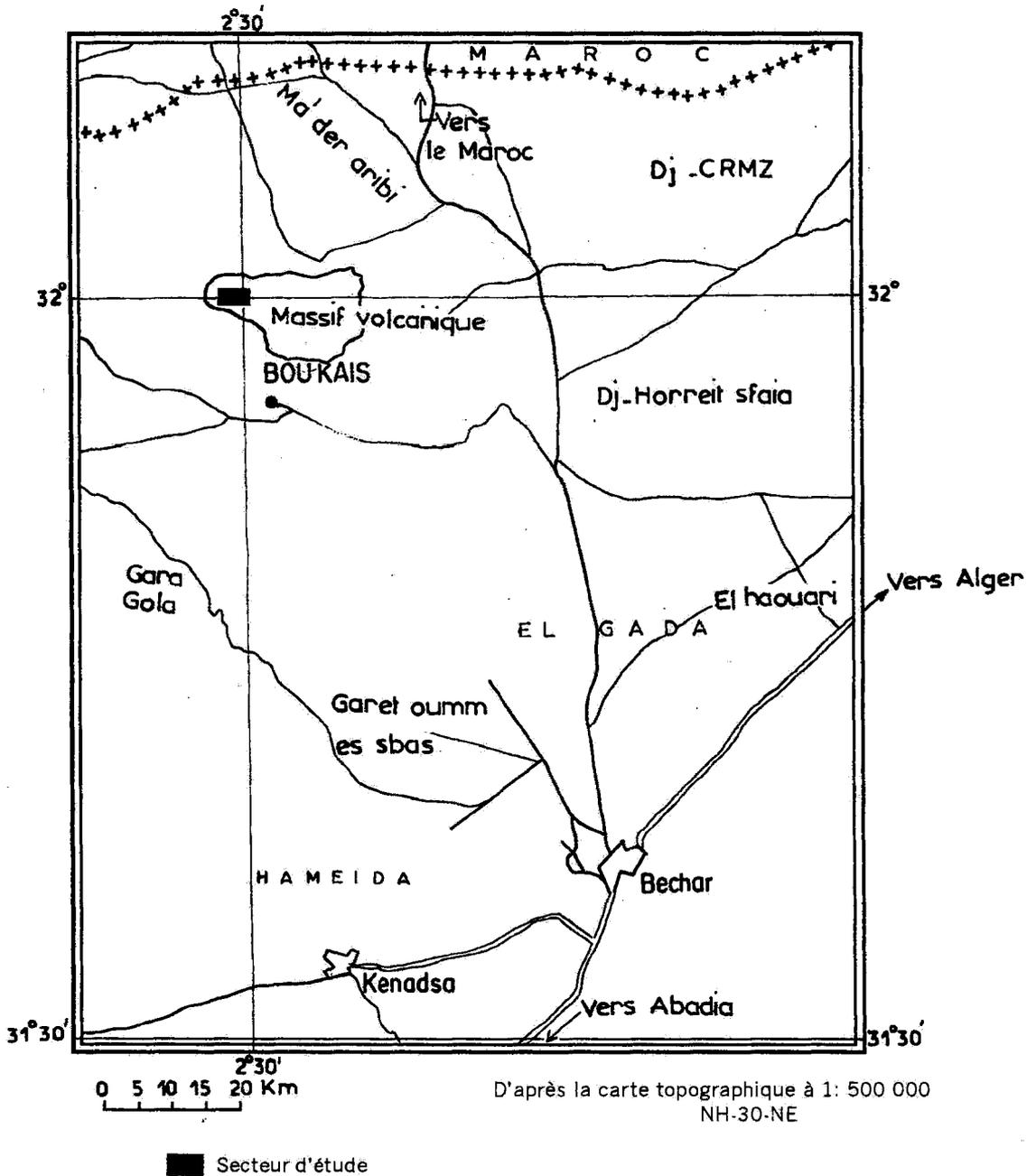


Fig. 1 - Carte de localisation du massif Boukais (Algérie)  
*Schematic map of Boukais complex (Algeria)*

constitué de roches volcano-sédimentaires précambriennes affleurantes au milieu de terrains carbonatés du Crétacé. Ces roches sont composées, surtout, d'andésite, de trachyte et de dacite. Les plus développées se rapportent aux faciès sub-volcanique et effusif-détritique (Meindre, 1955).

#### IV - MINERALISATION

La minéralisation est du type cuivre-polymétallique riche en argent. On distingue deux types de minéralisation encaissée dans les roches précambriennes de la structure de Boukais :

- Une minéralisation hydrothermale cuprifère liée aux fractures E-W et aux zones de silicification qui les accompagnent. Une vingtaine de ces zones ont été dénombrées dans toute la structure. Elles sont généralement lenticulaires et ont, du moins en apparence, très peu de continuité latérale et verticale. Les teneurs moyennes sont de 0,8% en cuivre et jusqu'à 1000 g/t en argent sur des épaisseurs de 1,5 m.

- Une minéralisation cuprifère de type stratiforme dans les schistes argileux de la série sédimentaire avec des teneurs plus faibles en cuivre.

- La minéralisation est, essentiellement, constituée de chalcosine faiblement oxydée en surface, en malachite et chrysocolle. Les autres minéraux sont moins fréquents : la pyrite, la galène, la bornite, l'azurite et le cuivre natif. La chalcopirite est relativement abondante. La covelline est rare et liée à la chalcosine.

Les minerais Cu-polymétalliques sont caractérisés par une composition minérale très variée. On note la présence de minéraux natifs (Cu, Pb, Sn.), de sulfures et sulfo-sels, d'oxydes et de carbonates. La présence d'un cortège d'éléments tels que : Mn, Ba, Sr, Cu, Pb, Ag, Bi, Mo, Sn, Ca, Al, confirme les spécificités géochimiques de cette minéralisation.

#### V - NATURE DE LA VEGETATION

Le tapis végétal existant reflète les conditions d'un climat aride caractérisé par l'absence (ou le faible développement) des sols. Les dépôts meubles holocènes sont du type éolien et éluvien-diluvien. La région de Boukais est caractérisée par une très faible humidité. La végétation est représentée par des espèces typiquement désertiques telles que le *Phlomis dactylifera*, *Acacia raddeana*, *Acacia seyal*, *Acacia arabica*, *Acacia albida*, *Pistacia atlantica*, *Retama raetam*, *Artemisia judaïca*.

La végétation semi-arbustive, représentée surtout par l'*Artemisia spirea* et le remtz, prédomine sur les affleurements des roches volcaniques et sur les dépôts meubles holocènes.

#### VI - ECHANTILLONNAGE ET METHODES ANALYTIQUES

L'efficacité des études biogéochimiques dépend surtout de la méthodologie, de l'organisation et de l'exécution correcte des travaux basés sur des essais expérimentaux. L'échantillonnage a été mené de façon à prélever des spécimens de plantes (*Artemisia spirea*, remtz) en surface des différents secteurs minéralisés et non minéralisés du périmètre du gisement de Boukais :

##### *Secteur III (conglomérats, grès...)*

Ce secteur est composé de minerais primaires Cu-polymétalliques oxydés (chrysocolle, malachite, cuivre natif, tenorite - cuprite, plombo-jarosite, chalcosine, bornite, galène...). L'échantillonnage a été effectué suivant trois profils transversaux distants de 60-70m avec un intervalle de 15-20 m entre les points de prélèvement (18 échantillons ont été prélevés).

*Secteur IV (andésites et plagioclases porphyriques)*

Le secteur IV est caractérisé par le développement d'une minéralisation disséminée, parfois filonienne, faiblement oxydée (galène, bornite, chalcosine...). Dans ce secteur des échantillons de plantes (*Artemisia* sp., remtz) ont été prélevés en différents points séparés des intervalles de 200 à 300 m.

*Secteur des andésites à texture doléritique.*

Ces roches sont exemptes d'altérations hydrothermales - métasomatiques. Des échantillons (12) de plantes ont été prélevés pour la caractérisation du fond géochimique.

Les travaux biogéochimiques et géobotaniques ont été menés conjointement en tenant compte des spécificités géochimiques régionales de la nature des roches en place. Les plantes prédominantes, au-dessus des corps minéralisés, sont l'*Artemisia* sp. et le remtz. Le poids de chaque échantillon (tige + feuilles) ne dépasse pas 250 - 400g.

Les principales méthodes analytiques utilisées sont la spectrographie d'émission U.V. (Laboratoire ORGM), l'analyse spectrométrique à excitation par plasma -ICP- (Laboratoire CRD / SONATRACH) et l'étude géobotanique (Institut d'Anthropologie d'Alger).

La préparation des échantillons aux analyses a été menée comme suit : tous les échantillons ont été séchés à l'air libre, pesés et brûlés dans des creusets en céramique ( $\theta = 15$  cm). Les résidus obtenus ont été incinérés dans un four à moufle. Le régime thermique ne dépassait pas 450°. Ces échantillons ont été pesés de nouveau pour le calcul de leurs teneurs en cendre. Les échantillons de cendre obtenus ont été soumis aux analyses élémentaires quantitatives pour le dosage de Cu, Pb, Zn, Ag, Mn, Mg, Al, Fe, Cr, Mo, Bi, Sn, As,

Sb, Ti, Ni, Co, V, Ba, Sr, Ga, Li, Zr.

## VII - RESULTATS OBTENUS

L'étude géobotanique a permis d'identifier trois principales familles de plantes (tab.1). La famille la plus répandue est celle des composées (composacées) (60%), suivie par les chenopodiacés (30 %) et les garyophyllacées (10%).

Les résultats obtenus de l'analyse élémentaire des plantes révèlent l'abondance des éléments chimiques mis en évidence dans les cendres de l'*Artemisia* sp. et du remtz prélevés en surface de la zone minéralisée (tab.2). Les plantes, issues de la zone non altérée, sont caractérisées par de faibles concentrations en éléments minéraux qui sont de l'ordre de leurs clarkes dans les roches.

## VIII - INTERPRETATION DES RESULTATS

Les résultats de l'analyse élémentaire quantitative des cendres ont démontré que d'après la classification de Beliaeva (1972), tous les éléments peuvent être regroupés en fonction de leurs propriétés biologiques et chimiques (tab. 3). Trois groupes ont été définis:

- Eléments à concentration élevée (Cu, Pb, Ba, Sn et Mo)
- Eléments à concentration normale (Zn, Sr, Li, Ni, Co, ...)
- Eléments à faible concentration (Ag, Fe, Mn, Al, ...)

D'après les coefficients de concentration (tab.2), deux grandes associations d'éléments minéraux ont été établies :

- 1<sup>ère</sup> association : Ag, Cu, Mo, Sr, Zn, Al, Co, Ba.

**Tableau 1 : Résultats de l'analyse géobotanique**  
*Geobotanical analysis*

Famille	Garyophyllacées ( <i>Garyophyllaceae</i> )	Chenopodiacés ( <i>Chenopodiaceae</i> )	Composées ( <i>Compositae</i> )
S/famille	paranychioidees		Tubuliflores
Tribu			Anthémidées
Genre	Gymnocarpus	Arthrophytum	Artemisia
Espèce	deconder	scoparium	herba-alba
Dénomination	Gymnocarpus deconder	Arthrophytum scoparium	Artemisia herba - alba
Nom commun	Forsk	-	Armoise
Nom arabe	Djefna	Remt, Nadjem	Chiha, Ifsi, Zeggaré

**Tableau 2 : Teneurs des éléments dans les cendres (%)**  
*Grade of elements in the ashes (%)*

Eléments	Teneurs dans les cendres des plantes de Boukais					Teneurs dans les cendres plantes continentales (Maliouga, 1963)	Clarkes des roches (Vinogradov, 1962)	
	Min.	Max.	Moy.	Fond Géochim.	Coeff.		Min.	Max.
Cu	16.10 <sup>-4</sup>	55.10 <sup>-3</sup>	102.10 <sup>-3</sup>	1.10 <sup>-3</sup>	55	2.10 <sup>-2</sup>	2.10 <sup>-3</sup>	1.10 <sup>-2</sup>
Pb	1.10 <sup>-3</sup>	66.10 <sup>-4</sup>	45.10 <sup>-4</sup>	23.10 <sup>-4</sup>	2,8	1.10 <sup>-3</sup>	15.10 <sup>-6</sup>	2.10 <sup>-3</sup>
Zn	4.10 <sup>-3</sup>	37.10 <sup>-3</sup>	15.10 <sup>-4</sup>	1.10 <sup>-3</sup>	37	9.10 <sup>-2</sup>	3.10 <sup>-3</sup>	6.10 <sup>-3</sup>
Ag	1.10 <sup>-7</sup>	1.10 <sup>-6</sup>	5.10 <sup>-7</sup>	1.10 <sup>-7</sup>	10	1.10 <sup>-4</sup>	5.10 <sup>-6</sup>	1.10 <sup>-5</sup>
Mo	5.10 <sup>-4</sup>	1.10 <sup>-3</sup>	4.10 <sup>-4</sup>	5.10 <sup>-4</sup>	50	2.10 <sup>-3</sup>	2.10 <sup>-5</sup>	1.10 <sup>-4</sup>
Sn	5.10 <sup>-5</sup>	5.10 <sup>-3</sup>	2.10 <sup>-3</sup>	1.10 <sup>-3</sup>	5	5.10 <sup>-4</sup>	5.10 <sup>-5</sup>	3.10 <sup>-4</sup>
Li	—	3.10 <sup>-3</sup>	3.10 <sup>-3</sup>	1.10 <sup>-4</sup>	5	11.10 <sup>-4</sup>	5.10 <sup>-5</sup>	6.10 <sup>-2</sup>
Zr	5.10 <sup>-3</sup>	4.10 <sup>-2</sup>	25.10 <sup>-3</sup>	5.10 <sup>-3</sup>	8	n10 <sup>-4</sup> -n10 <sup>-3</sup>	3.10 <sup>-3</sup>	26.10 <sup>-3</sup>
Ga	—	1.10 <sup>-3</sup>	1.10 <sup>-3</sup>	5.10 <sup>-4</sup>	2	n.10 <sup>-4</sup>	2.10 <sup>-4</sup>	3.10 <sup>-3</sup>
Mn	1.10 <sup>-2</sup>	5.10 <sup>-2</sup>	35.10 <sup>-3</sup>	1.10 <sup>-2</sup>	5	75.10 <sup>-2</sup>	6.10 <sup>-2</sup>	15.10 <sup>-2</sup>
Ti	5.10 <sup>-4</sup>	24.10 <sup>-4</sup>	15.10 <sup>-4</sup>	16.10 <sup>-4</sup>	2	1.10 <sup>-1</sup>	3.10 <sup>-2</sup>	23.10 <sup>-2</sup>
Cr	5.10 <sup>-4</sup>	1.10 <sup>-3</sup>	1.10 <sup>-3</sup>	5.10 <sup>-4</sup>	2	25.10 <sup>-3</sup>	25.10 <sup>-4</sup>	2.10 <sup>-1</sup>
Ni	5.10 <sup>-4</sup>	4.10 <sup>-3</sup>	4.10 <sup>-3</sup>	5.10 <sup>-4</sup>	8	5.10 <sup>-3</sup>	8.10 <sup>-4</sup>	2.10 <sup>-1</sup>
Co	5.10 <sup>-4</sup>	4.10 <sup>-3</sup>	4.10 <sup>-3</sup>	2.10 <sup>-4</sup>	20	15.10 <sup>-4</sup>	5.10 <sup>-4</sup>	2.10 <sup>-2</sup>
V	5.10 <sup>-4</sup>	15.10 <sup>-4</sup>	38.10 <sup>-4</sup>	7.10 <sup>-4</sup>	2	61.10 <sup>-4</sup>	4.10 <sup>-3</sup>	4.10 <sup>-3</sup>
Ba	6.10 <sup>-2</sup>	8.10 <sup>-1</sup>	33.10 <sup>-2</sup>	6.10 <sup>-2</sup>	13	n.10 <sup>-2</sup>	1.10 <sup>-4</sup>	83.10 <sup>-3</sup>
Sr	5.10 <sup>-3</sup>	5.10 <sup>-2</sup>	31.10 <sup>-3</sup>	1.10 <sup>-3</sup>	50	3.10 <sup>-2</sup>	1.10 <sup>-3</sup>	8.10 <sup>-2</sup>
Fe	6.10 <sup>-2</sup>	97.10 <sup>-2</sup>	38.10 <sup>-2</sup>	16.10 <sup>-2</sup>	6	1	2,7	9,85
Mg	1.10 <sup>-1</sup>	9.10 <sup>-1</sup>	175.10 <sup>-3</sup>	11.10 <sup>-2</sup>	8	7	56.10 <sup>-2</sup>	25,90
Al	3.10 <sup>-2</sup>	1,90	47.10 <sup>-2</sup>	79.10 <sup>-3</sup>	24	1,4	45.10 <sup>-2</sup>	7,40

**Tableau 3 : Répartition des éléments dans les plantes et dans les roches du gisement de Boukais**  
*Repartition of elements in plants and in the rocks of Boukais deposit*

Caractères Chimiques (des éléments)	TENEURS		
	Elevée	Normale	Faible
Gros cations	Pb, Ba	Sr, Li	Ag
Petits cations	Cu, Sn	Zn, Ni, Co	Fe, Mg, Mn
Hydroamphotères Ions complexes	Mo	Ga, V, Zr, Ti	Cr, Al

- 2ème association : Zr, Ni, Mg, Fe, Mn, Sn, Li, Pb, Ga, Ti Cr, V.

Chacune de ces associations est caractéristique de la minéralisation cuivre-polymétallique et de la végétation qui lui est associée. De ce fait la présence de ces éléments dans les plantes peut être indicatrice de la dite minéralisation. Les rapports de certains éléments indicateurs (Cu/Ag, Sn/Ag, Pb/Ag, Ba/Sr.....) sont de valeurs assez constantes.

Les plantes de la région de Boukais se distinguent des autres plantes continentales (Maliouga, 1963) par des teneurs élevées en Ba, Ga, Zr, Cu, Pb, Sn, Li, Co, et de faibles teneurs en Ni, V, Fe, Al, Mg, Mo, Sr, Mn, Zn Ti, Ag, Cr. Cette association d'éléments est spécifique du paysage (semi) désertique et aride de Boukais. Les teneurs anormales de certains éléments chimiques dans ces végétaux sont conditionnées par leurs liaisons directes avec la minéralisation et les roches en place.

Les familles de plantes mises en évidence se distinguent par des concentrations sélectives des éléments :

- Les caryophyllacées : le cuivre.
- Les chenopodiacées : le cuivre et en partie le plomb.

- Les composées : le zinc, le molybdène et le lithium.

L'analyse des données obtenues a ainsi permis de constater une corrélation positive entre les teneurs des éléments minéraux dans les minerais et dans les plantes sus-jacentes. Ces valeurs peuvent être utilisées en tant que guide géochimique dans la prospection de minéralisation cuivre-polymétallique, analogue à celle de Boukais.

## IX - CONCLUSIONS

Les résultats des essais méthodologiques de biogéochimie réalisés sur le gisement cuivre-polymétallique de Boukais, porté par des roches volcaniques précambriennes, ont permis de dégager les conclusions principales suivantes:

- Pour le paysage (semi)-désertique de Boukais, la distribution des éléments (Pb, Zn, Ag, Mo, Zr, Mn, Ba, Sr...) est souvent régulière dans les végétaux de la couverture des corps minéralisés.
- La distribution du cuivre est très irrégulière dans les minerais cuivre-polymétalliques de Boukais.
- Une corrélation positive a été constatée entre les teneurs des éléments minéraux dans les végétaux et les corps minéralisés sous-jacents.

- Les méthodes de prospection biogéochimique peuvent être utilisées, surtout pour la mise en évidence des anomalies lithogéochimiques et la délimitation des zones minéralisées.

## X - RECOMMANDATIONS

Il est recommandé lors des travaux de prospection biogéochimique de minéralisation cuivre-polymétallique, dans des régions désertiques ou semi-désertiques :

- d'échantillonner des spécimens d'*Artemisia spirea* et du remtz car dans ces plantes, la mise en évidence des associations des éléments (Cu, Pb, Zn, Ag, Mo, Ba, Sr) est considérée comme indicatrice de minéralisation cuivre-polymétallique riche en argent,

- de mener la prospection biogéochimique en parallèle avec le levé géologique et les travaux de prospection dans les régions favorables, du point de vue géochimique et métallogénique, à la présence de minéralisation cuivre - polymétallique.

Il convient de noter que les travaux biogéochimiques à moyenne et petite échelles doivent être effectués sur la base de résultats obtenus et de recommandations élaborées à la suite des essais méthodologiques préliminaires de biogéochimie.

**Remerciements** : L'auteur tient à remercier vivement le Professeur Serge ELMi du Centre des Sciences de la Terre - Université Claude Bernard de Villeurbanne (France) et le Professeur Christian MARIgnac de l'Ecole des Mines de Nancy (France) pour leur lecture critique.

## BIBLIOGRAPHIE

- BELIAEVA E. E., VASILIEVA N.N., GRABOVSKAYA L.I., ZEGREBINA N.L., MASSIOUTINA S.A., 1972** - Les instructions méthodiques sur le levé géologique 1/50.000. Série 11 « Etudes biogéochimiques et géobotaniques ». Ed. Nédra, Léninegrad, 280 p.
- CANNON M.L., 1955** - Géochimical relations of zinc-bearing plat to the hockport dolomite or léans contry, *US, Géol. Surv. Bull.* 1000-D.
- CANNON M.L., 1960** - Botanical prospecting for ore déposita, *Su*, 132, N° 34227
- DUVIGNAUD P., 1958** - La végétation du Katanga et de ses sols métallifères. *Bull. Sté Royale de Botanique de Belgique*, Bruxelles, 90, 127 - 286.
- MALIOUGA D.P., 1963** - La méthode biogéochimique de recherche des gîtes minéraux (exemples et pratique de recherche). *Bull. Acad. sciences de l'URSS*.
- MEINDRE M., 1955** - Etude géologique du massif de Boukaïs. *Bull. BRMA*, N° 2, Algérie.
- RAMKAMA K.K., 1947** - Saome recent trends in prospecting chemical, biogeochemical and geobotanical méthodes. *Mining and métal*, 28, 282-284.
- SALMI M., 1956** - Peat and bog plants as indicators of ore minerals in Vihanti ore field in oustern Finland. *Bull. Commiss. Geol. Finlande*, Helsinki, N°175, 22 p.
- VINOGRADOV A.P., 1962** - La teneur moyenne en éléments chimiques dans les principaux types de roches magmatiques de l'écorce terrestre. *Journal Géochimie*, N° 7.
- WARREN H.V., HOWATSON G.H., 1947** - Biogeochemical prospecting for copper and zinc. *Bull. Géol. Soc. Amer.*, Vol. 58, N° 9.
- WARREN H.V., DELAVAUlt R.E., 1955** - Some biogeochemical investigations in eastern Canada. *Can. Min. Journal*, Vol. 76, N° 7, 43-54.
- WEBB J.S., MILLMAN A.P., 1951** - Heavy metals in vegetation as a guide to are. *Inst. Min. Met. Trans.*, Vol. 60, pt 2.