

EXPLORATION MINERALE PAR GEOCHIMIE DES SOLS DANS LA REGION D'ARTEAGA (MICHUACAN, MEXIQUE)¹

par

Alain MELCHIOR², Henri NEYBERGH^{2†}, Lucie BUVE³, Léon DEJONGHE²
José VARGAS CARDENAS⁴, Jaime NUNEZ ESPINAL⁵ & Raimundo BASTIDA⁵

(10 figures et 3 tableaux)

RESUMEN.- Un programa de exploración mineral por geoquímica de suelos fue llevado a cabo en México durante un año. Los trabajos de campo, realizados en una región montañosa difícil de acceso, duraron seis meses. Los trabajos de laboratorio (análisis químicos), los procesos de datos (procesos de resultados químicos y de imágenes de satélites) con su interpretación geoquímica fueron efectuados, en mayor parte, en Bélgica. Los resultados principales son los siguientes:

- La puesta en aplicación con éxito del programa de exploración mineral por el medio de la geoquímica de suelos, en una región donde la evolución pedológica es poco desarrollada.
- La puesta en evidencia de algunas anomalías polimetálicas y de una anomalía estructurada de oro.
- La asociación espacial del oro y del arsénico.
- El descubrimiento de rocas auríferas.
- La proposición de un modelo metalogénico sucinto llegando a un guía de prospección por lo menos local si no regional.

Por último, la abundancia relativa de afloramientos en la región de Arteaga permitió de elaborar un plano geológico bastante detallado para conocer las características químicas de las seis poblaciones litológicas principales de esta región.

Los resultados parciales del programa realizado son bastante esperanzadores para justificar la continuación de los estudios y de los trabajos de exploración mineral en esta región.

ABSTRACT.- A geochemical exploration programme was carried out in Mexico during one complete year. Field studies, executed in a montaneous area not easily accessible, lasted six months. Laboratory work (chemical analysis), data processing (chemical data processing & satellite image processing) and their geochemical interpretation were mostly realized in Belgium. The main results obtained are to following:

- The successful execution of the pedogeochemical method in a region where soil evolution is not very developed.
- The localization of various polymetallic anomalies and one gold anomaly.
- The discovery of gold-bearing rocks.
- The proposal of a metallogenetic model leading to a prospection guide of at least local and perhaps regional scale.

Finally, the relative abundance of outcrops in the Arteaga region allowed to elaborate a geological map with sufficient detail in order to know the chemical characteristics of the six major lithological populations from that area.

The partial results of this exploration programme are encouraging enough to justify the continuation of the work and studies in progress in that region.

1. Manuscrit révisé reçu le 16 janvier 1992.

2. Service Géologique de Belgique.

3. Université Catholique de Louvain-la-Neuve.

4. Consejo de Recursos Minerales (Pachuca, HGO).

5. Consejo de Recursos Minerales (Morelia, MICH).

RESUME.- Un programme d'exploration minérale par géochimie des sols a été mis en oeuvre, pendant une année, au Mexique. Les travaux de terrain ont été exécutés en six mois dans une région montagneuse difficilement accessible. Les travaux de laboratoire (analyses chimiques), les divers traitements de données (traitements statistiques et traitements d'images satellites) et leur interprétation géologique ont été réalisés principalement en Belgique. Les résultats majeurs sont les suivants:

- La mise en oeuvre avec succès de l'exploration minérale par géochimie des sols dans une région à évolution pédologique peu développée.
- La mise en évidence de plusieurs anomalies polymétalliques et d'une anomalie aurifère correspondant à une structure géologique reconnue.
- L'association spatiale de l'or et de l'arsenic.
- La découverte de roches porteuses d'or.
- La proposition d'un modèle métallogénique succinct aboutissant à un guide d'exploration local et possiblement régional.

Enfin, la relative abondance des affleurements dans la région d'Arteaga a permis d'élaborer une cartographie géologique suffisamment détaillée pour connaître les caractéristiques géochimiques des six unités lithologiques présentes dans la région.

1.- INTRODUCTION

L'objectif de cet article est de présenter les principaux résultats d'un programme d'exploration minérale qui s'est déroulé pendant une année dans le cadre d'une convention de collaboration entre le Service géologique de Belgique et le Consejo de Recursos Minerales du Mexique.

Le site d'exploration d'Arteaga est localisé dans l'Etat du Michoacan, au centre-ouest du Mexique.

L'objectif principal du projet était de démontrer l'applicabilité de la méthode géochimique dans le cadre d'un programme d'exploration minérale axé particulièrement sur la recherche de l'or.

Le programme de prospection par géochimie a été réalisé en deux étapes: une phase d'exploration générale ayant couvert 226 km² et une phase détaillée sur 7,5 km².

Les travaux réalisés sur le terrain au cours du projet d'exploration minérale d'Arteaga ont été les suivants:

Exploration générale

- Un levé géologique à 1:50.000.
- Un échantillonnage pédologique à la maille 500 x 500 mètres.
- Le pré-traitement de 896 échantillons de sol (désagrégation, séchage, quartage, tamisage à 212 μ m).

Exploration détaillée

- Un levé géologique à 1:5.000.
- Un échantillonnage pédologique à la maille 250 x 50 mètres.
- Le pré-traitement de 651 échantillons de sol (désagrégation, séchage, quartage, tamisage à 212 μ m).

Les travaux effectués au Mexique et en Belgique ont été les suivants:

- 1545 analyses multi-éléments par torche à plasma (DCP).
- 751 analyses d'or par spectromètre d'absorption atomique couplé à un four à graphite.
- Une étude pétrographique sur 16 roches.
- Des traitements d'images satellite (Spot 1 et Landsat T.M.).
- Des traitements statistiques des données chimiques.
- La cartographie et l'interprétation des résultats analytiques.

2.- GEOLOGIE LOCALE

Les cartes géologiques des sites d'exploration générale et détaillée sont présentées aux figures 1 et 2.

La région d'Arteaga est située dans l'ensemble mésozoïque de la Sierra Madre del Sur.

Les unités lithologiques de la région sont, par ordre chronologique:

- Le socle, d'âge permo-triasique. Il comprend, essentiellement, des schistes noirs et, accessoirement, des micaschistes.
- L'unité volcano-sédimentaire, d'âge triasique. Elle est formée par des métalaves andésitiques et des schistes de couleurs variées.
- La formation arénitique, d'âge jurassique à crétacé. Elle renferme principalement des arkoses.
- Les intrusifs cénozoïques. Ils sont représentés par des granites, granodiorites et des diorites.
- Les corps filoniens. Ils sont le plus souvent constitués par des dykes de diabase et de microdiorite. Les filons de quartz sont nombreux.

Les phases orogéniques en relation avec les différents processus de subduction au niveau de la fosse pacifique ont engendré des plissements, des épisodes métamorphiques et magmatiques au cours de plusieurs époques d'enfouissement et de soulèvement.

2.1.- METAMORPHISME REGIONAL

Le premier épisode métamorphique de la région affecte les sédiments terrigènes du socle. Le métamorphisme génère des biotitoschistes dont la paragenèse est quasi ubiquiste. L'existence d'un faciès à sillimanite-grenat suggère que ces roches ont subi, localement, un métamorphisme de degré moyen (Winkler, 1979) correspondant au faciès amphibolite d'Eskola.

Le second événement métamorphique a lieu après le dépôt de la série volcano-sédimentaire. Les roches du socle sont affectées par une rétro-morphose qui se marque principalement au sein des faciès à sillimanite-grenat (noyaux de grenat corrodé). L'association chlorite-épidote-biotite de la série volcano-sédimentaire suggère que les roches appartiennent au faciès schiste vert.

2.2.- METAMORPHISME DE CONTACT ET METASOMATISME

La mise en place de corps intrusifs au Cénozoïque a donné lieu à des phénomènes de métamorphisme thermique et à des processus d'altération hydrothermale. Les effets de la température et des circulations de fluides ont engendré, dans l'encaissant situé au voisinage des intrusions granodioritiques et dioritiques, des phénomènes de recristallisation et de métasomatisme. Les principales modifications intervenues dans les roches encaissantes sont :

- Un enrichissement en fer (provoquant une cristallisation massive de magnétite) et en aluminium-calcium (responsable de la formation d'épidote).
- Une silicification des roches volcano-sédimentaires.
- Une sulfurisation assez peu développée (pyrrhotite, chalcopyrite, pyrite, sphalérite).

L'occurrence de lentilles de calcaire cristallin (marbre) non loin et au contact des intrusifs basiques a engendré un métamorphisme de contact au cours duquel la magnétite a cristallisé en masse en milieu basique. Les silicates principaux provenant des processus métamorphique (hydrothermalisme et métamorphisme de contact) sont la trémolite et le quartz. Les minéraux accessoires sont la wollastonite et le grenat (Nunez *et al.*, 1988).

NB: les processus d'argilisation, de kaolinisation, de limonitisation sont le plus souvent liés à des mécanismes d'altération chimique supergène.

2.3.- TECTONIQUE

La première schistosité S1, parallèle à S0, est une schistosité pénétrative de plan axial affectant les roches du socle. Elle est inclinée, en général de 50° vers le SE.

La seconde schistosité S2 est essentiellement une schistosité de fracture E-W, à pendage subvertical, qui a généré des clivages peu apparents dans les volcanites compactes mais bien développés dans les métasédiments de l'unité volcano-sédimentaire. Dans les roches du socle, la reprise de la première schistosité par la seconde a donné naissance, le plus souvent, à une linéation inclinée d'environ 20° vers l'ouest et, localement, à une schistosité de crénulation bien développée.

Quelques microplis isoclinaux ont été trouvés sur des blocs de schistes noirs. D'autre part, l'examen des images du satellite Spot 1 a mis en évidence l'existence de structures morphologiques qui pourraient traduire la présence de mégaplis isoclinaux, à vergence NW, dans le socle.

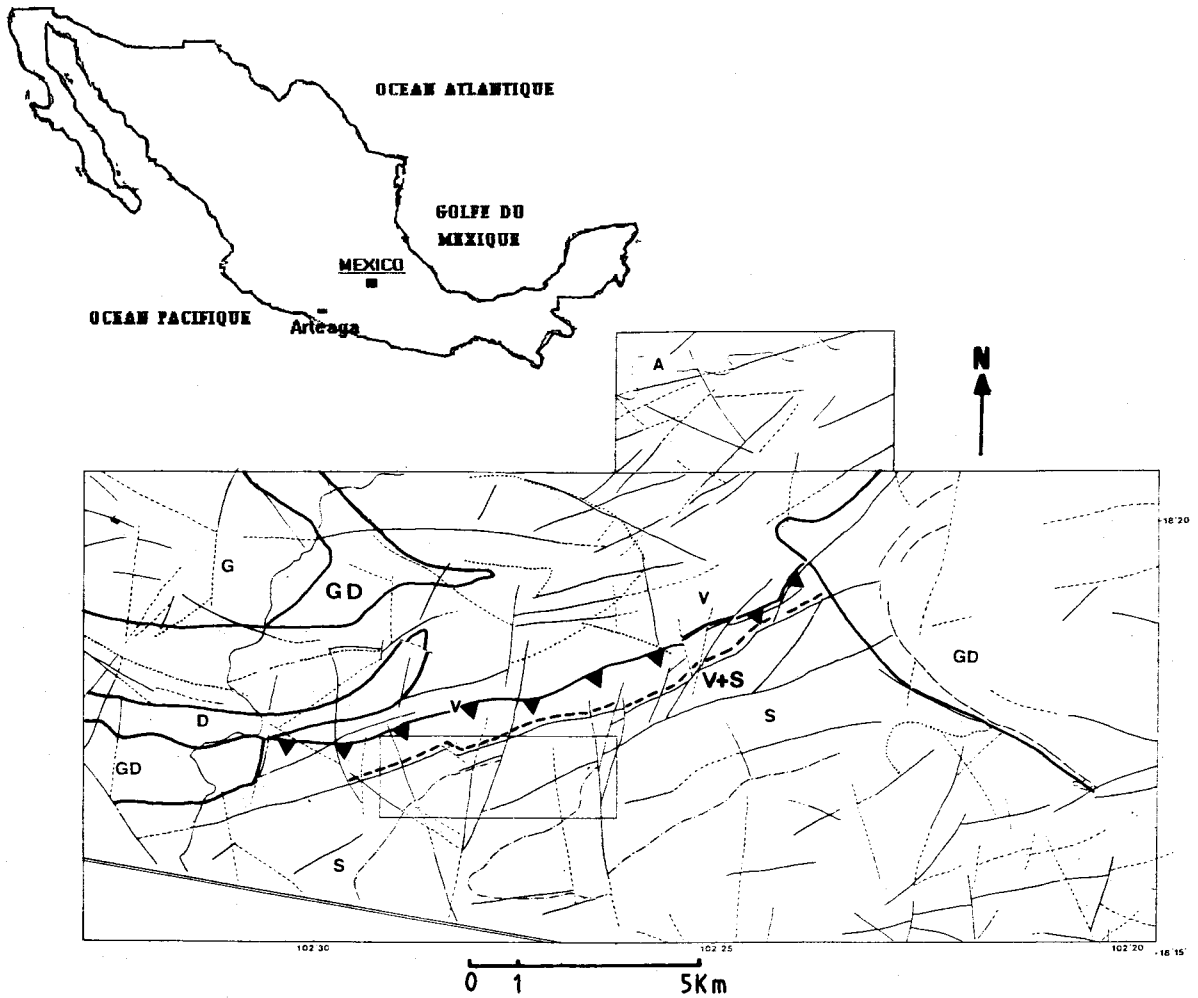
Du point de vue tectonique cassante, la région d'Arteaga est principalement caractérisée par un chevauchement plurikilométrique ENE dont la pente est de 10 à 30° vers le SSE (fig. 1). La zone de charriage fait se chevaucher socle et couverture volcano-sédimentaire sur quelques kilomètres à quelques dizaines de kilomètres. Les failles tardives sont des failles verticales normales NE à ENE et des failles de décrochement NNW à N-S.

3.- ANALYSES CHIMIQUES

Pour l'analyse multi-élémentaire, une attaque acide totale HNO₃, HF, HClO₄ a été réalisée. Les solutions ont ensuite été analysées au spectromètre d'émission simultané à source plasma (DCP ARL Spectraspan III) pour 14 éléments (Cr, Mn, As, Ti, Fe, Ni, Cu, Co, Y, Pb, V, La, Sr, Ba). Les limites de détection sont voisines de 1 ppm pour tous les éléments excepté pour l'As dont la limite de détection est de l'ordre de 10 ppm.

Pour les analyses d'or, la mise en solution des échantillons consiste en une attaque à l'eau régale suivie par une extraction par MIBK.

Les solutions sont alors analysées par un spectromètre d'absorption atomique (AAS Varian 1475) avec atomisation au four à graphite (Varian GTA 95). La limite de détection est de 5 ppb (Buvé, 1991).



CARTE MORPHO-STRUCTURALE DU PROSPECT D'ARTEAGA
(d'après le traitement des images des satellites Spot 1 & Landsat TM)

LITHOLOGIE

CORPS INTRUSIFS

Gd : granodiorite

D : diorite

G : granite

FORMATION ARENITIQUE

A : arkoses

UNITE VOLCANO-SEDIMENTAIRE

V : méta-andésites, schistes, tufs

SOCLE

S : schistes noirs, micaschistes

TRAITS STRUCTURAUX

ELEMENTS OBJECTIFS

———— : linéament apparent

----- : linéament peu apparent

..... : structure en crête

ELEMENTS INTERPRETATIFS

----- : structure morpho-tectonique

----- : limite morpho-tectonique

▼▼▼ : chevauchement

Fig. 1a.- Carte géologique du prospect général d'Artega.



Fig. 1b.- Mexique, Michoacan. Région d'Arteaga.

4.- TRAITEMENTS & CARTOGRAPHIE DES DONNEES CHIMIQUES

Pour ce projet d'exploration par géochimie des sols, nous avons choisi un traitement statistique informatisé des résultats analytiques. Trois types principaux de traitement statistique ont été appliqués. Ce sont l'analyse statistique univariée, l'analyse statistique multivariée et l'analyse des tendances.

4.1.- STATISTIQUE UNIVARIEE

En vue de réaliser l'analyse statistique univariée, nous avons préalablement séparé les principales formations lithologiques (fig. 3).

Dans une première étape, les types de distribution ont été déterminées. Il s'est avéré que le modèle de distribution correspondant le plus à l'ensemble des échantillons est du type lognormal alors qu'au sein de chaque entité lithologique la distribution normale est la plus courante.

Pour l'ensemble des échantillons de l'exploration générale, la séparation des populations a été réalisée sur base des courbes de probabilité des fréquences cumulées. Pour chaque élément, les seuils séparant les différentes populations ont été sélectionnés sur base des résultats des calculs fournis par l'analyse de distributions des fréquences et ont été réajustés pour tenir compte de l'environnement géologique. La question de la signification géologique de seuils statistiques est posée dans le cadre d'un environnement géologique bien reconnu (Melchior *et al.*, 1991). Le tableau I illustre le cas du Cr et Mn.

Grâce à ce premier traitement, la caractérisation géochimique générale des principales formations lithologiques est réalisable en se basant sur les éléments à signature strictement lithochimique. Les cartes de la figure 4 montrent l'exemple pour le Cr et le Mn.

Le socle métasédimentaire est relativement riche en Cr alors que les teneurs en Mn sont plus élevées dans les roches intermédiaires et basiques des formations d'origine magmatique (méta-andésites, granodiorites, diorites). Une recherche plus précise des limites géochimiques séparant les différentes lithologies ne se justifie pas étant donné la superposition des teneurs pour la plupart des éléments analysés dans les différents faciès. De plus, il faudrait tenir compte des effets d'autres paramètres difficilement quantifiables comme la

morphologie, la végétation, le climat, les contaminations éventuelles, etc.

En plus du traitement statistique de l'ensemble des données géochimiques, nous avons traité, séparément, chaque unité lithologique.

L'interprétation géochimique des résultats est discutée brièvement pour les échantillons pédologiques provenant du corps granitique situé à l'ouest du prospect (libellé G des fig. 1 et 3). Ainsi, pour la plupart des éléments en trace de type ferromagnésien (Cr, Mn, Ti, Fe, Ni, Cu, Co, V, \pm Sr), l'analyse statistique univariée met clairement en évidence trois populations arithmétiques (Tab. I). La cartographie des résultats suggère que ces populations reflètent une variation lithologique importante au sein des granites. La figure 5 illustre le cas des éléments Cr, Ti, Fe, V.

D'après la structure de distribution des plus fortes teneurs en éléments ferro-magnésiens, il pourrait s'agir d'un dyke basique NW subaffleurant et recoupant le corps granitique.

Étant donné le nombre élevé des populations statistiques au sein de chaque faciès, les seuils anormaux, sélectionnés selon des critères classiques en statistique (moyenne \pm 1 à 2 fois l'écart-type), sont difficilement cartographiables. Un traitement simplifié est proposé (Melchior *et al.*, 1991). Pour chaque élément, il s'agit de placer les données sur un graphique de variations des

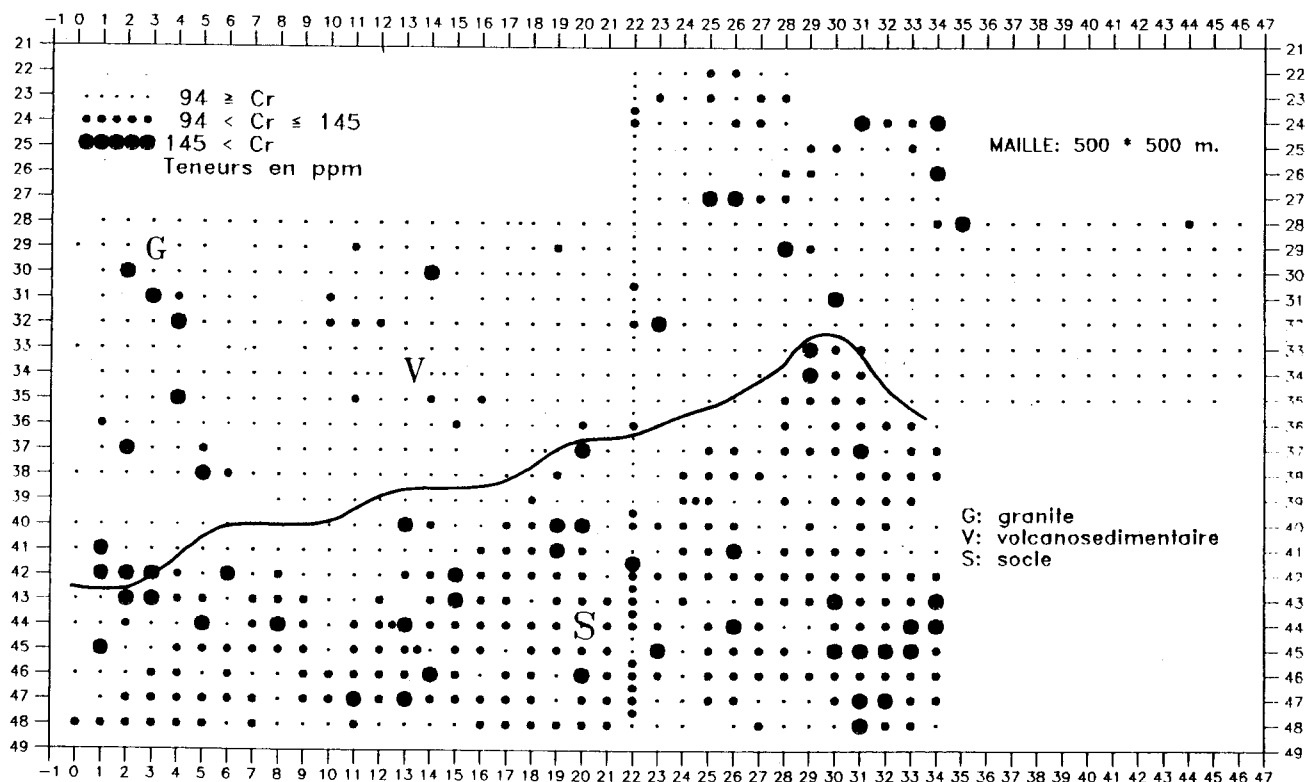


Fig. 4.- Carte du Cr (4a) et Mn (4b) réalisées à partir de l'analyse statistique univariée basée sur l'étude des distributions de fréquences (distribution lognormale)

Tableau I.- Séparation et caractérisation des populations statistiques au sein des unités lithologiques différenciées.
Analyse des distributions de fréquences pour Cr et Mn.

TYPE DE FORMATION LITHOLOGIQUE							
Cr	ARTEAGA	GRANITE	GD-DI ouest	GD est	ARENITES	SOCLE	V-S
Nbre d'éch.	890	46	54	112	49	390	285
Nbre POP.	3	3	3	3	3	3	3
Type de POP.	L	A	A	A	A	A	A
% POP. 1	68	80	80	90	30	30	80
MOY. POP. 1	40,6	17,1	37,8	40,1	35,3	49,3	36,9
SD POP. 1	24,1	3,8	15,8	9,1	11,8	34,4	13,4
SEUIL POP.1	Cr < 94	Cr < 29	Cr < 74	Cr < 65	Cr < 56	Cr < 82	Cr < 68
% POP. 2	25	15	10	7	65	60	17
MOY. POP. 2	112,9	77	89,6	79	97,5	109,1	92,2
SD POP. 2	11,1	63,6	18,7	7,8	22,7	13	19,2
SEUIL POP.2	94 < Cr < 145	29 < Cr < 226	74 < Cr < 130	65 < Cr < 101	56 < Cr < 148	82 < Cr < 145	68 < Cr < 147
% POP. 3	7	5	10	3	5	10	3
MOY. POP.3	215,6	380	238	181,8	159	208,2	241,9
SD POP. 3	80,4	274	151,2	189,3	14,7	69,5	60,9
SEUIL POP.3	Cr > 145	Cr > 226	Cr > 130	Cr > 101	Cr > 148	Cr > 145	Cr > 147
Mn	ARTEAGA	GRANITE	GD-DI ouest	GD est	ARENITES	SOCLE	V-S
Nbre POP.	3	3	3	4	3	3	3
Type de POP.	L	A	A	A	A	A	A
% POP. 1	70	80	70	15	85	70	80
MOY. POP. 1	310	98,5	592,9	371,4	481,9	271,8	664,6
SD POP. 1	2402	37,8	246,1	163,2	281,6	106,3	326,4
SEUIL POP.1	Mn < 809	Mn < 199	Mn < 1096	Mn < 574	Mn < 1090	Mn < 483	Mn < 1314
% POP. 2	28	15	25	55	14	15	17
MOY. POP. 2	1111	321,3	1356,8	836,9	1368,3	574,5	1596,1
SD POP. 2	218,9	196,4	147,5	120,8	356,7	70,4	385,6
SEUIL POP.2	809 < Mn < 1785	199 < Mn < 705	1096 < Mn < 1619	574 < Mn < 1020	1090 < Mn < 2042	482 < Mn < 726	1314 < Mn < 2614
% POP. 3	2	5	5	25	1	15	3
MOY. POP.3	2672	915,7	1679,5	1122,8	2131	1151,3	3598,4
SD POP. 3	931,4	138,7	128,9	87,6	106,6	464,2	1070,3
SEUIL POP.3	Mn > 1785	Mn > 705	Mn > 1619	1020 < Mn < 1320	Mn > 2042	Mn > 726	Mn > 2614
% POP. 4				5			
MOY. POP.4				1451,9			
SD POP. 4				114,1			
SEUIL POP.4				Mn > 1320			

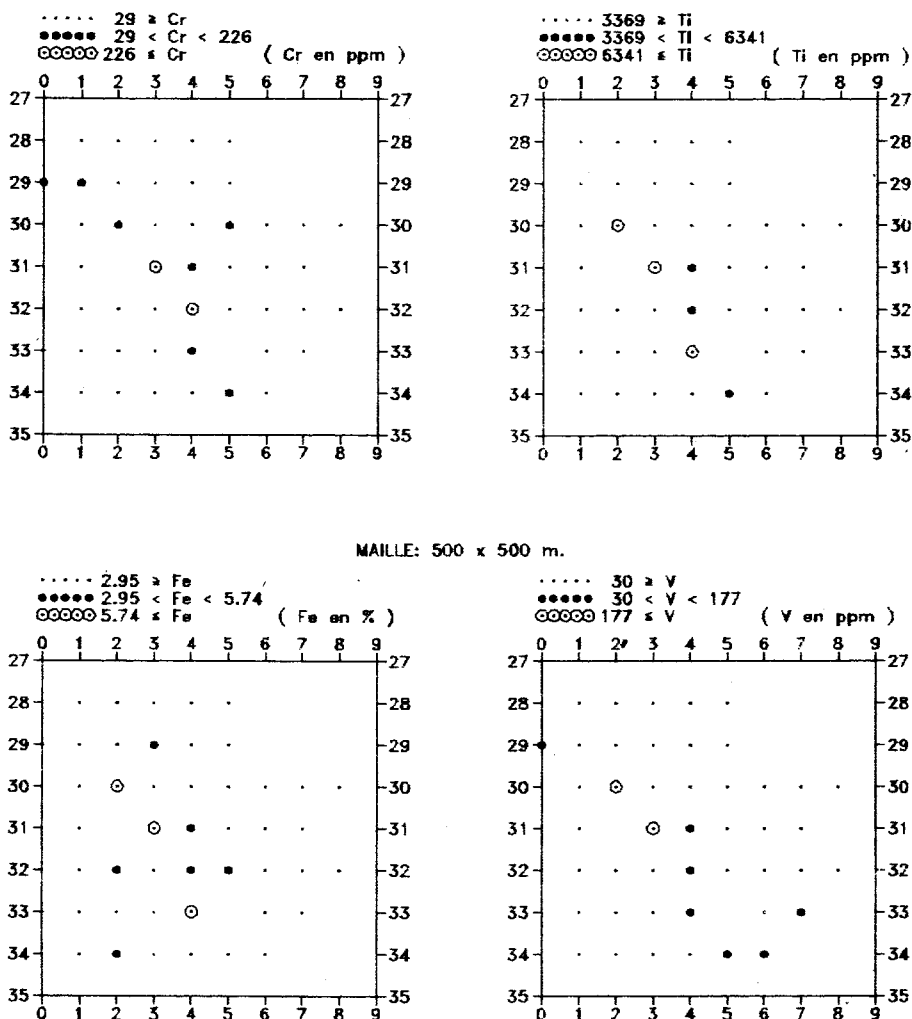


Fig. 5.- Représentation cartographique des résultats de l'analyse des distributions de fréquences pour le corps granitique affleurant à l'ouest du prospect général (libellé «G» carte de la figure 3). Eléments considérés : Cr, Ti, Fe, V.

teneurs en fonction de chaque formation lithologique. En construisant un diagramme de type spectral, on peut ainsi voir que la plupart des courbes séparant les populations sont subparallèles. L'étape suivante consiste à définir visuellement les limites séparant les populations arithmétiques. La figure 6 illustre le cas de Fe, Cr, Ti, As.

En fait, ce type de diagramme est une autre représentation de distribution normale arithmétique. Son intérêt réside dans la rapidité de visualisation des teneurs anormales et cela pour chaque unité lithologique. Les points situés en dehors des courbes et qui ne se répètent pas dans chaque faciès peuvent être logiquement considérés comme des échantillons anormaux au sein de la population considérée.

Les points anormaux, de faible intensité par rapport à l'ensemble des teneurs, pourraient représenter des échantillons se rapportant à une autre formation lithologique majeure. Ainsi, sur base des études pétrographique, les sols les plus

riches en Cr et assez pauvres en Fe et éléments accompagnateurs (Ti, V, Ni, Co, Cu) indiquent probablement la présence sous-jacente de roches ultrabasiques, lithologie inconnue jusqu'à présent dans la région.

Cependant, les plus hautes teneurs anormales (Mn, As, Fe, Cr, Ti) peuvent, entre autre, être liés à des enrichissements supergènes en relation ou non avec des minéralisations dans la roche primaire où, quelque fois, traduire la présence de faciès lithologiques complètement différents.

4.2.- STATISTIQUE MULTIVARIEE

Dans un premier temps, l'analyse statistique multivariée a consisté à calculer la matrice des coefficients de corrélation pour chaque groupe lithologique et à représenter les teneurs sur des diagrammes de dispersion (Melchior *et al.*, 1991). Ultérieurement, une analyse factorielle basée sur les composantes principales a été effectuée pour les échantillons provenant des six principaux faciès lithologiques différenciés.

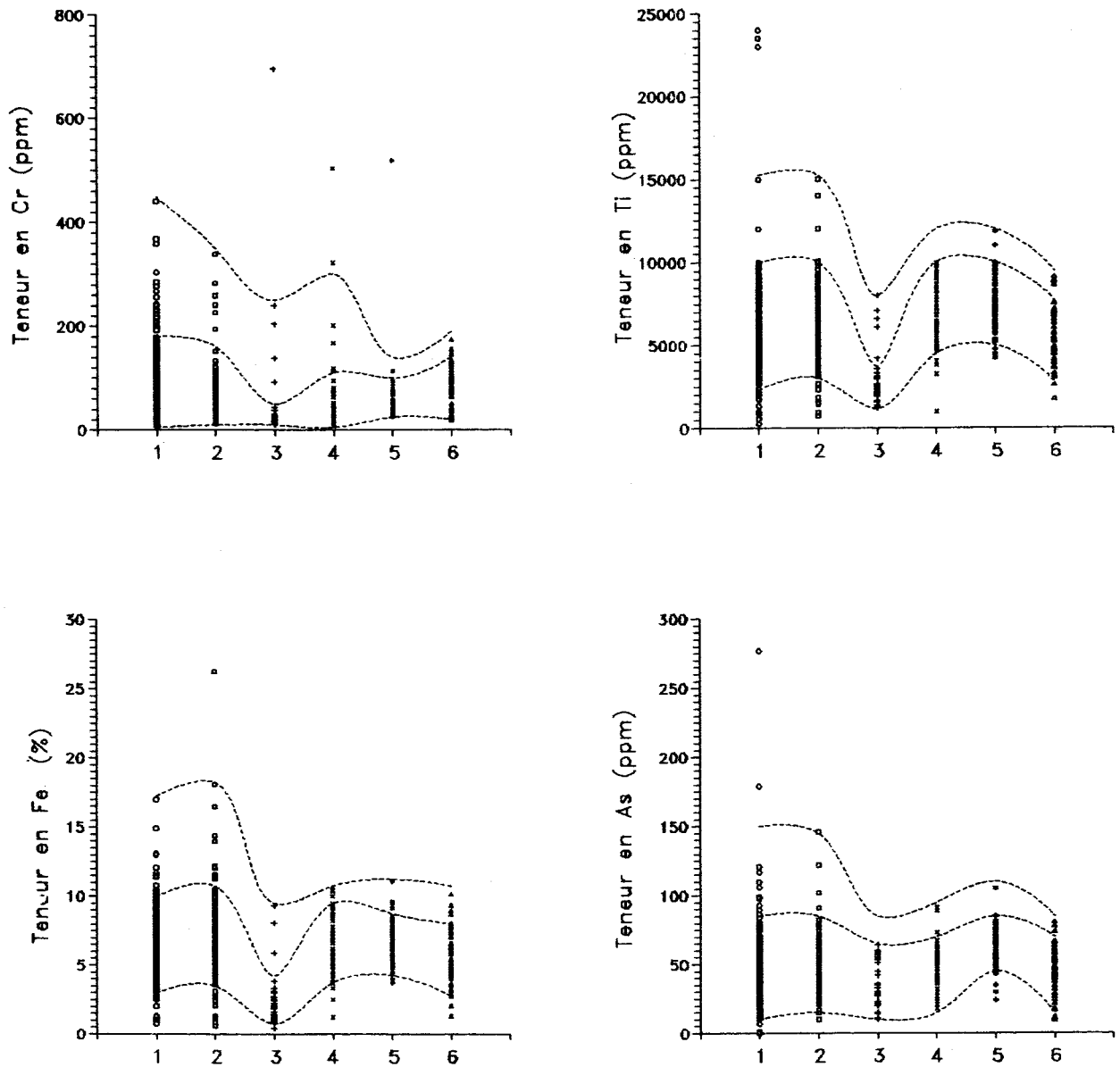


Fig. 6.- Diagrammes de distribution arithmétique des teneurs pour chaque population lithologique.
Éléments considérés : Cr, Ti, Fe, As.

Tableau II.- Matrice des coefficients de corrélation pour les 101 échantillons de la phase intermédiaire de l'exploration générale.

Ensemble des échantillons (890 éch.), excepté pour l'or (100 éch.)															
	Au	Cr	Mn	As	Ti	Fe	Ni	Cu	Co	Y	Pb	V	La	Sr	Ba
Au	1,00														
Cr		1,00													
Mn	0,06	-0,01	1,00												
As	0,12	0,01	0,32	1,00											
Ti	0,08	0,25	0,29	0,28	1,00										
Fe	0,16	0,20	0,46	0,40	0,61	1,00									
Ni	0,16	0,68	0,11	0,13	0,35	0,31	1,00								
Cu	0,10	0,20	0,10	0,13	0,27	0,38	0,27	1,00							
Co	0,15	0,20	0,54	0,38	0,51	0,65	0,39	0,34	1,00						
Y	0,17	-0,18	0,22	0,25	0,09	0,16	-0,07	0,03	0,22	1,00					
Pb	0,00	0,02	0,67	0,43	0,35	0,40	0,07	0,07	0,47	0,23	1,00				
V	0,06	0,28	0,38	0,34	0,57	0,68	0,28	0,31	0,53	0,00	0,45	1,00			
La	-0,01	0,12	-0,06	0,10	0,09	0,04	0,22	0,15	0,17	0,57	0,03	-0,09	1,00		
Sr	-0,05	-0,20	0,53	0,32	0,12	0,19	-0,14	-0,07	0,35	0,25	0,70	0,31	-0,06	1,00	
Ba	-0,04	0,13	-0,10	-0,07	-0,09	-0,19	0,10	0,09	-0,13	-0,09	-0,12	-0,11	0,23	-0,17	1,00

Pour l'ensemble des échantillons, les coefficients de corrélation les plus élevés sont pour les paires d'éléments suivants (Tab. II): Pb-Sr (0,70), Cr-Ni (0,68), Fe-V (0,68), Mn-Pb (0,67), Fe-Co (0,65) et Fe-Ti (0,61).

La comparaison des résultats provenant des coefficients de corrélation et de la cartographie des résultats chimiques fait ressortir la prudence avec laquelle il faut interpréter les valeurs intrinsèques des coefficients de corrélation linéaire. En effet, il existe une association spatiale évidente entre l'or et l'arsenic (fig. 7) quoique les deux surfaces anomales ne coïncident pas parfaitement. Il en résulte évidemment une mauvaise corrélation statistique ($R=0,12$). Cela pourrait s'expliquer par une mobilité différentielle de Au et As lors du processus d'altération météorique. En

Tableau III.- Synthèse des résultats de l'analyse factorielle.

FACTEURS	Nbre d'éch.						
		ARTEAGA					
ASS. ELEMENTS		F1	F2	F3	F4	F5	F6
% variance		Sr-Pb-Mn 23%	Fe-Cu-V-Ti-Co 25%	La-Y 15%	Cr-Ni 17%	Ba 10%	As 9%
FACTEURS	46	GRANITES SECTEUR OUEST		F3			
ASS. ELEMENTS		F1	F2				
% variance		Co-V-Cu-Fe-Ti Mn-Cr-Sr-Pb-Ni 7.0%	Y-La-As 2.0%	Ba 1.0%			
FACTEURS	54	GRANODIORITES SECTEUR OUEST		F3	F4	F5	
ASS. ELEMENTS		F1	F2				
% variance		Sr-Pb-Mn 2.2%	La-Y-(Ba) 1.7%	Cu-As-(Co) 1.6%	Cr-Ni 1.3%	Fe-Ti-Co-V 3.1%	
FACTEURS	112	GRANODIORITES SECTEUR EST		F3	F4	F5	
ASS. ELEMENTS		F1	F2				
% variance		Sr-Pb-Mn 2.3%	V-Ti-Fe-Co 2.7%	Cr-Ni 1.6%	La-Y-Ba 2.3%	As-(Cu) 1.1%	
FACTEURS	49	ARENITES		F3	F4		
ASS. ELEMENTS		F1	F2				
% variance		Fe-V-Ti-Co Cu-Ni-Cr-Mn 4.6%	Sr-Pb-(La) 2.2%	Ba-(Cr) 2.0%	Y-(La) 1.2%		
FACTEURS	390	SOCLE		F3	F4	F5	
ASS. ELEMENTS		F1	F2				
% variance		Ni-Cr-Ti- Co-V-Fe-Cu 3.2%	Mn-Sr-Pb 2.3%	Y-La 1.7%	Ba - (Cu) 1.4%	As - (Fe-V) 1.4%	
FACTEURS	205	VOLCANO SEDIMENTAIRE		F3	F4	F5	F6
ASS. ELEMENTS		F1	F2				
% variance		Pb-Sr-As-Mn 2.5%	Y-La 1.5%	Ti-V-(Fe) 1.7%	Cr-Ni 1.7%	Ba 1.0%	Cu-Co-Fe 1.8%

définitive, dans ce cas, l'As est un bon indicateur de Au malgré un mauvais coefficient de corrélation entre ces deux éléments.

La synthèse des informations obtenues par l'étude des coefficients de corrélation a été réalisée via une analyse factorielle. La méthode choisie est celle des composantes principales avec transformation orthogonale-varimax. La synthèse des résultats de l'analyse factorielle est présentée Tab. III.

Pour l'ensemble des échantillons, on a pris en considération les six premiers facteurs. Le calcul des six facteurs à partir de la matrice des coefficients de corrélation a permis de discerner six groupes d'éléments.

La faible corrélation entre les facteurs 1 et 2 ($r = 0,36$) souligne la relativement faible dépendance du Mn, Pb, Sr vis-à-vis des éléments liés au ferromagnésiens (Fe, Ti, V, Co, Cu). Les corrélations positives entre les facteurs 1 et 2, d'une part, et le

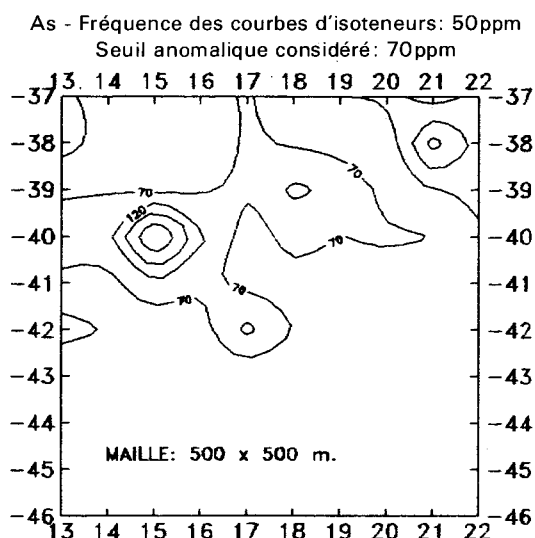
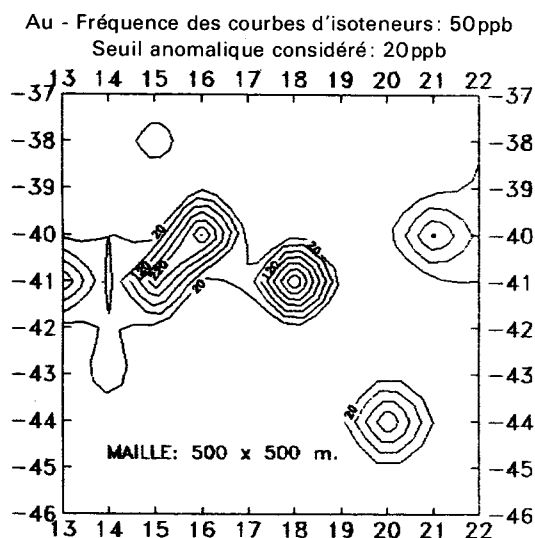


Fig. 7.- Corrélation spatiale Au-As pour la phase intermédiaire de l'exploration générale (9/1990).

facteur 6 ($R = 0,44$ & $0,36$), d'autre part, sont essentiellement le résultat de la liaison entre certains métaux de base (Fe, Pb, Co, V, Sr) et l'arsenic.

4.3.- ANALYSE DES TENDANCES

Cette analyse a été réalisée à partir d'un logiciel de calcul de grille et de cartographie fonctionnant sous MS-DOS.

Comme la grille régulière est originellement constituée (maille carrée de $500 * 500$ mètres), il reste uniquement à déterminer la méthode de calcul de la grille en tenant compte de sa structure régulière.

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i / (d_i)^2}{\sum_{i=1}^n (1 / (d_i)^2)}$$

$$Z_i = \text{point voisin}$$

$$d_i = \text{distance}$$

$$n = \text{nombre de points voisins}$$

La valeur du coefficient de pondération a été choisie telle que l'influence des points environnants soit suffisante pour tenir compte des facteurs géochimiques de dispersion (halos d'altération). La figure 7 montre la carte des tendances de l'or et de l'arsenic pour le premier secteur couvert en phase d'exploration générale.

La carte de synthèse des distributions des hautes teneurs en arsenic et en fer est donnée figure 8. On y note une structuration géochimique tout à fait comparable à la structure géologique

régionale, c'est-à-dire orientée NNE. De plus, pour l'arsenic, on observe également clairement une distribution des hautes teneurs selon une structure de mégapli isoclinal reflétant peut-être une structure tectonique sous-jacente.

5.- INTERPRETATION GEOCHIMIQUE DES RESULTATS

L'association Mn-Pb-Sr traduit probablement la présence d'un groupe minéral supergène qui pourrait être du type psilomélane-coronadite-propylite. Sachant que Pb et Sr ont une forte affinité pour les plagioclases, il est probable que l'altération des plagioclases en kaolinite/séricite n'affecte pas la proportion originelle de ces deux éléments dans les sols. Par ailleurs, comme le coefficient de partage du Sr entre le plagioclase et le magma augmente avec la basicité du plagioclase, il apparaît logique que les roches différenciées de composition intermédiaire à basique contiennent le plus de Sr (fig. 9).

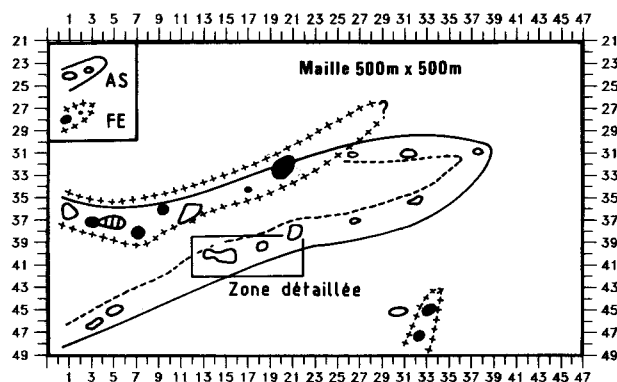


Fig. 8.- Carte de synthèse des tendances en surface des hautes teneurs en Fe ($> 12\%$) et As (> 100 ppm) pour le prospect général (site d'Arteaga).

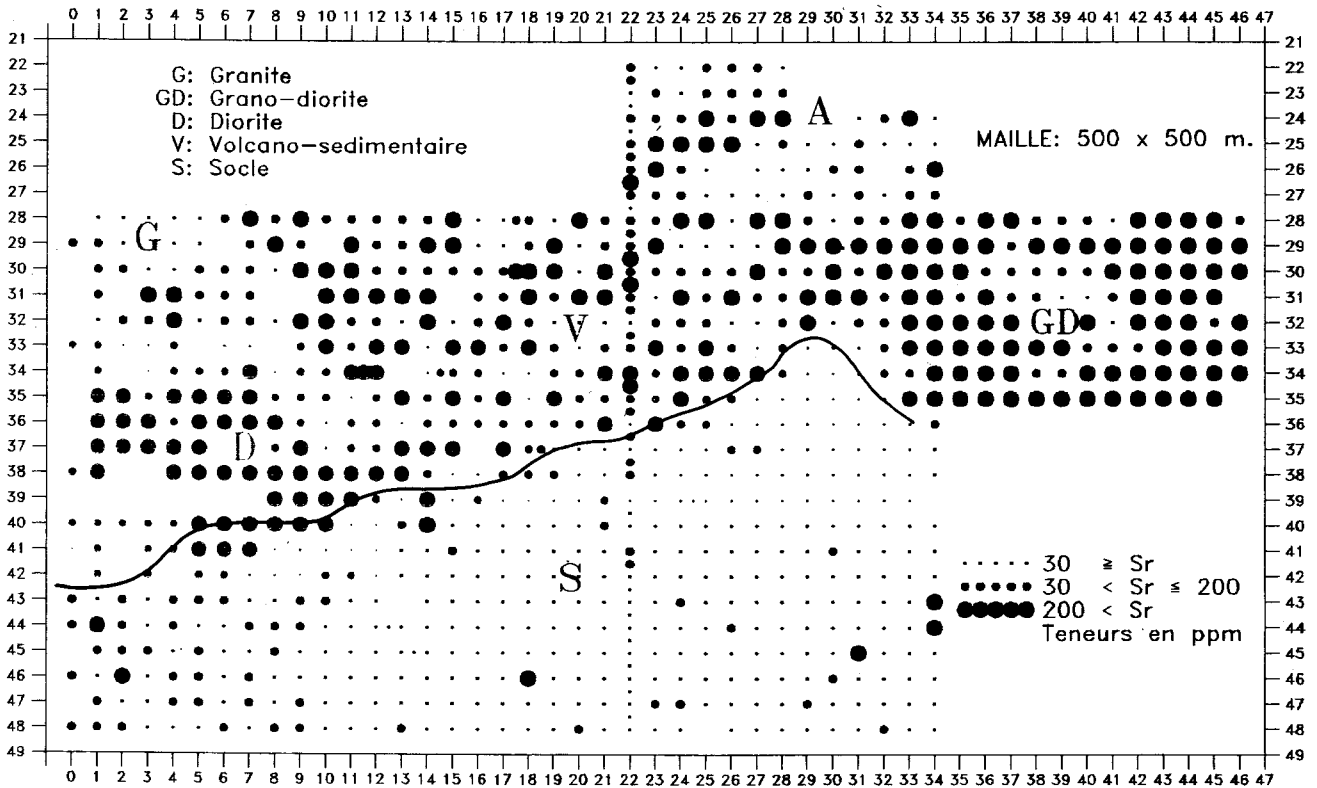


Fig. 9.- Artega : Site d'exploration générale.
Cartographie des résultats du traitement statistique monovarié pour le strontium.

Etant donné que les roches les plus riches en Pb et Sr sont aussi les plus riches en Mn, on peut supposer que les plus fortes teneurs en ces trois éléments soient associées à des roches magmatiques du type: granodiorite, diorite, métaandésite. Le Mn est probablement essentiellement contenu dans des silicates ferro-magnésiens, communs aux trois lithologies, c'est-à-dire les épidotes (allanite, piémontite,...). L'examen des lames minces a confirmé l'abondance d'épidote dans toutes les roches magmatiques de composition intermédiaire et basique.

L'association Fe-Cu-V-Ti-Co reflète la liaison des éléments en trace ayant des affinités géochimiques avec le fer. Ces affinités traduisent des associations dans des silicates ferro-magnésiens (pyroxènes, amphiboles, micas) et des oxydes (magnétite, ilménite, titano-magnétite,...). Dans les sols, l'altération de ces minéraux donne le plus souvent des oxydes de fer du type hématite, goéthite, et hydromicas contenant les mêmes associations élémentaires.

L'association Cr-Ni suggère une fois de plus la forte affinité de ces deux éléments pour les silicates ferro-magnésiens du type pyroxène/amphibole, dans les roches intermédiaires à basiques. Localement, la chloritisation des silicates ferro-magnésiens, au cours du métamorphisme régio-

nal, ne semble pas avoir affecté le rapport Cr/Ni original du minéral néoformé.

L'association La-Y peut s'expliquer par la présence de ces deux terres rares dans des minéraux accessoires tels que la monazite, le xénotime, ou encore l'apatite. On constate également une certaine liaison des terres rares avec le Ba dans les plutonites intermédiaires et basiques.

Comme l'arsenic est lié spatialement à l'or et qu'il n'existe aucune corrélation entre ces deux éléments, il est intéressant d'examiner plus en détail les associations entre l'As et les autres éléments. Pour l'ensemble des échantillons, les corrélations As-Pb ($r=0,43$) et As-Fe ($r=0,40$) sont les plus élevées.

C'est au sein du corps granodioritique/dioritique occidental que l'As montre la plus forte corrélation avec un autre élément; il s'agit du Co ($r=0,66$). Dans le socle, l'As est relativement bien corrélé avec le Fe ($r=0,45$). Pour les roches de l'unité volcano-sédimentaire, Pb, Sr, Mn sont les mieux corrélés avec l'As ($r=0,60$ & $0,40$). Ces résultats sont confirmés par l'analyse factorielle. De plus, on peut observer que,

- dans les granites et les arénites, l'As est corrélé aux terres rares La, Y.
- dans les granodiorites et diorites, l'As est lié au

Cu, et, en plus, au Co dans les roches plus basiques du secteur occidental.

- dans le volcano-sédimentaire, l'As est lié à l'association Mn-Pb-Sr.
- dans le socle, l'As est surtout associé au Fe.

Les différentes associations de l'As sont principalement dépendantes de la lithologie. L'interprétation se fera en se référant à la roche mère saine même si les phases supergènes porteuses sont le plus souvent différentes des phases minérales primaires. Au vu des résultats du traitement des données chimiques directement interprétables en terme lithologique, il semble que les processus de mobilité chimique et la formation d'associations minérales supergènes influencent peu l'interprétation géochimique en terme de lithologie. Une explication pourrait être trouvée dans le faible développement des horizons pédologiques.

En essayant d'interpréter les affinités chimiques à l'échelle minérale, on peut penser que, dans les intrusifs intermédiaires à basiques, l'As, localisé plutôt dans les phases riches en Cu et \pm Co, se trouve dans des sulfures de type arsénopyrite, pyrrhotite, chalcopyrite.

Dans les roches claires, (granites, arkoses), As semble se situer dans des phases porteuses de terres rares (La, Y).

Dans les roches volcano-sédimentaires, la liaison de l'As avec le Pb et le Sr dans les plagioclases semble, a priori, incohérent avec la capacité d'échange, essentiellement fonction des rayons ioniques de ces trois éléments. Comme la

substitution Pb-Sr est possible, le processus le plus vraisemblable est la formation d'arséniates, contenant Pb et Sr, dans les sols recouvrant le volcano-sédimentaire.

Dans le socle, l'As est plutôt lié au Fe et V, probablement associés dans les oxydes de fer supergènes.

6.- SYNTHÈSE DES ANOMALIES TROUVÉES

6.1.- LE GITE DE FER DE LOS POZOS

Le gîte de fer de Los Pozos est une minéralisation métasomatique connue pouvant être assimilée à un gîte de type exoskarn (Nunez *et al.*, 1988).

L'exploration générale a permis de découvrir des enrichissements en Fe, Mn, Pb et Ba dans la zone du gisement. Ceux-ci pourraient s'expliquer par l'existence de paragenèses typiques de skarns à magnétite.

6.2.- LA MINÉRALISATION AURIFÈRE DE LOS POZOS

La carte de distribution de Au et As (fig. 10) montre clairement l'association spatiale des hautes teneurs en As et Au.

Le seuil $As > 120$ ppm limite à peu près la zone la plus riche en or.

Les résultats de l'exploration détaillée nous montre que la relation spatiale Au-As ne joue que dans le sens $Au \rightarrow As$. C'est ainsi que le secteur

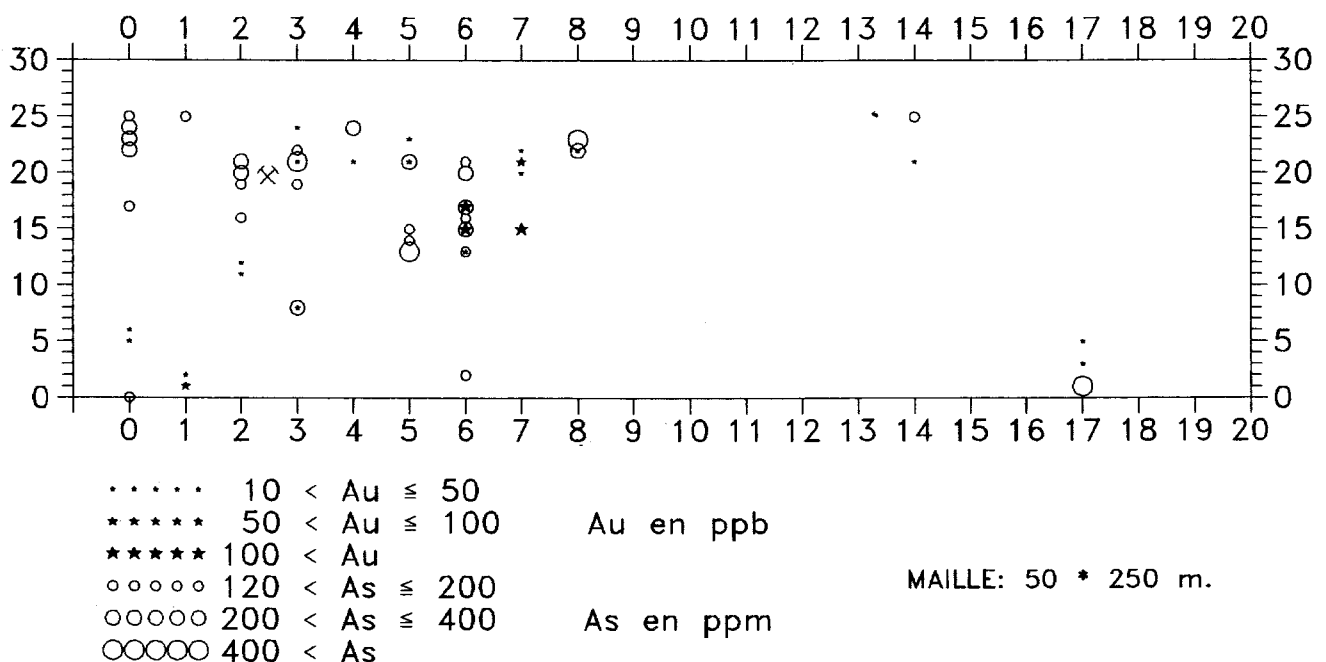


Fig. 10.- Site d'exploration détaillé d'Arteaga - Los Pozos.
Carte montrant la corrélation spatiale des anomalies en or et en arsenic.

NW du prospect est riche en arsenic et ne contient pas d'or fin ($\text{Au} < 212 \mu\text{m}$).

Si on regarde la carte géologique du prospect (fig. 2), il est clair que les plus fortes teneurs en As sont associées à des corps granodioritiques.

Les granodiorites, affleurant exclusivement à l'ouest du prospect, renferment probablement de l'arsénopyrite localement aurifère.

Le fait de ne pas trouver de l'or dans la partie la plus occidentale du corps granodioritique peut s'expliquer par la granulométrie de l'or. S'il y a de l'or dans la partie occidentale du corps granodioritique, il pourrait se trouver dans la fraction grossière et/ou associé au quartz. Dans cette hypothèse, le tamisage des sols à $212 \mu\text{m}$ pourrait expliquer l'absence d'or dans la fraction fine. Par ailleurs, la présence d'une ancienne petite unité artisanale («La Michoacana») où l'or a été exploité par gravimétrie suggère que la plus grande quantité d'or contenue dans ce filon de quartz était sous forme libre et de granulométrie assez grossière.

En imaginant l'existence de tels filons aurifères superficiels, la faible dispersion de l'or libre à l'aplomb des filons serait un sérieux handicap pour espérer localiser les halos aurifères dans des horizons pédologiques peu développés.

Ce fait nous amène à souligner la difficulté de mettre en évidence par géochimie des minéralisations aurifères marquées par une granulométrie grossière associée à un caractère inhomogène (effet pépite) et une occurrence très locale. Malheureusement dans le cadre d'une exploration pédochimique, il semblerait que ces minéralisations, où l'or libre grossier se trouve dans des filons de quartz, soient, de par la faible dilution de l'or, les minéralisations les plus riches. Si tel est bien le cas et si l'objectif minier le permet, la recherche des corps filonniens situés à la périphérie des corps granodioritiques est une priorité. Cela pourrait se faire par des méthodes géophysiques au sol (résistivité, VLF et, éventuellement, des sondages de reconnaissance ou par une prospection par batée des sols).

6.3.- ASPECTS METALLOGENIQUES

L'absence totale d'or dans les schistes noirs du socle indique que le milieu sédimentaire n'était pas enrichi en cet élément, tout au moins dans cette zone. La concentration de l'or dans certains secteurs à schiste noir (*Zapotillo*) a probablement été favorisée par la superposition de processus géologiques complexes au cours d'une évolution polycyclique (magmatisme, hydrothermalisme, tectonique,...).

En ce qui concerne l'évolution polyphasique des concentrations aurifères au cours des cycles

géologiques successifs, on pourra se référer aux nombreux travaux récents effectués dans l'environnement géologique archéen de la région de Timmins (Roberts, 1981; Karvinnen, 1981; Pyke, 1981) et dans le contexte mésozoïque/cénozoïque chilien à gîtes aurifères épithermaux et gîtes du type «porphyry» (Sillitoe, 1991; Davidson, 1991). La découverte de filons de quartz aurifères (teneur en Au de l'ordre de 400 ppb) dans la séquence volcano-sédimentaire suggère que cette dernière était déjà enrichie en or. La circulation de fluides siliceux liée à l'altération hydrothermale épivolcanique et plus tard les phénomènes de ségrégation métamorphique ont pu concentrer l'or dans des lentilles et/ou filons de quartz. Par la suite, la mise en place de corps magmatiques pouvant être localement aurifères a pu, à nouveau, permettre la mobilisation du stock aurifère et sa concentration dans des filons de quartz autour des intrusions, préférablement de composition intermédiaire. L'enrichissement en or des granodiorites peut être d'origine mantélique, au niveau de cette portion de la zone de subduction, et/ou induit partiellement par l'assimilation de l'encaissant volcano-sédimentaire renfermant une quantité anormalement élevée en or.

Tardivement, les événements cassants surimposés aux cassures pré-existantes ont sûrement joué un rôle non négligeable dans la formation des minéralisations aurifères. Dans ce sens, la recherche de gîtes du type «shear zone» à proximité de la zone de chevauchement socle - volcano-sédimentaire est à approfondir surtout à partir des données de la télédétection.

Du point de vue géochimique, une réduction de Au^{+3} amenant à la précipitation de Au^0 est envisageable lors du passage de solutions aurifères (chlorées à HT ou sulfurées à BT) d'un milieu oxydant (fluides hydrothermaux oxydants) vers les schistes noirs réducteurs où la fugacité de soufre ($f\text{S}_2$) est suffisamment élevée pour permettre la précipitation de sulfures du type pyrite et/ou pyrrhotite.

A relativement faible profondeur, le passage dans la zone d'ébullition et/ou une dilution favorise(nt) la destruction du complexe bisulfuré par départ de H_2S et conséquemment la précipitation de l'or.

D'après les données thermodynamiques, une précipitation de l'or dans des conditions superficielles (BT) est envisageable sous haute $f\text{S}_2$, le plus souvent au-dessus de la zone à galène-sphalérite. Sous plus faible $f\text{S}_2$, Pb-Zn-Au précipitent quasi au même niveau et donnent des gîtes polymétalliques de Pb-Zn-Au-Ag (*In Boyle et al., 1979*). En gros, la profondeur de précipitation est essentiellement fonction de la présence ou non de H_2S .

Au niveau du gisement de fer de Los Pozos, la cristallisation massive de magnétite indique des

conditions basiques (Coipel & Dimanche, 1981). Un pH élevé aux abords des roches skarnifiées (calcaires et roches basiques) dans un milieu riche en ions Cl^- favorise la mobilisation de l'or au niveau de la roche mère et son transport. Dans cette hypothèse, les minéralisations d'or pourraient se situer à un niveau supérieur à celui du fer. Ce dernier type de processus physico-chimique pourrait dès lors expliquer pourquoi on ne trouve pas d'or dans les granodiorites/diorites de la partie occidentale du prospect général.

7.- CONCLUSIONS

Du point de vue géochimique, les principales conclusions sont:

- la forte liaison entre la géochimie des recouvrements et la lithogéochimie résultant du faible développement des horizons pédologiques.
- la mise en évidence d'éléments traceurs lithochimiques donnant par ce fait une caractérisation lithochimique généralement cohérente avec les études pétrographiques et les données du levé géologique.
- le rôle indicateur d'or joué par l'arsenic bien qu'il n'existe pas de corrélation statistique valable entre As et Au.
- l'existence d'un faible décalage spatial entre l'or et l'arsenic.

Du point de vue métallogénique, les résultats de l'étude montrent que la source de l'or, dans la région de Los Pozos, est magmatique.

La mise en place de minéralisations aurifères est principalement contrôlée par la présence d'intrusifs granodioritiques riches en As, de préférence non loin de structures intensément faillées, liées à un chevauchement à l'échelle régionale, où les solutions hydrothermales ont pu jouer un rôle mobilisateur, transporteur, et éventuellement concentrateur.

Les granodiorites enrichis en As contiennent le plus d'or fin ($> 212 \mu\text{m}$). La majorité de l'or grossier semble se trouver principalement sous forme libre dans des filons de quartz.

Vu les basses teneurs dans les granodiorites, les minéralisations quartz-or paraissent présenter le plus d'intérêt économique.

Les corps granodioritiques cachés et contenant de l'As devraient être recherchés prioritairement, particulièrement ceux présents au sein des schistes noirs du socle et situés aux environs immédiats de la structure tectonique chevauchante limitant socle et couverture volcano-sédimentaire dans le secteur d'Arteaga (Nuñez & Melchior, 1991).

Dans cette optique, les indices géologiques et chimiques nous suggèrent d'approfondir les recherches dans le coin SE du secteur détaillé. L'occurrence de nombreux filons microdioritiques, de l'isograde de la sillimanite et de faibles teneurs en or dans les sols pourraient trahir la présence, à relativement faible profondeur, d'un corps intrusif enrichi en Au et As.

REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont à toutes les personnes ayant participé au projet d'exploration minérale d'Arteaga. Parmi ces personnes, citons particulièrement les aidants à la prospection sans lesquels le travail de terrain, souvent exécuté dans des conditions difficiles, n'aurait pu être réalisé. La revue du manuscrit par les Professeurs F. Dimanchet et H. Martin a été grandement appréciée.

Nous remercions également le Consejo de Recursos Minerales du Mexique, le Ministère des Affaires Economiques et le Secrétariat d'Etat à l'Energie de Belgique qui ont financé ce projet.

Nous dédions cet article au Dr. H. Neybergh disparu tragiquement en mission le 22 septembre 1990 à Lazaro Cardenas (Mexique).

BIBLIOGRAPHIE

- BOYLE, R.W., 1979.- The geochemistry of gold and its deposits. *Geological Survey of Canada* : 584 p.
- BUVE, L., 1991.- Equipo y metodos de analisis utilizados en los laboratorios de la Universidad de Lovaina, Belgica. Seminario interno sobre actualizacion de metodologia de analisis fisico-quimicos; 9-12/1/1991, Guachinango (Jal, Mexico).
- COIPEL, J. & DIMANCHE, F., 1981.- Evolution diagénétique des oxydes de fer chrome et titane. *Bull. de Minéralogie*, 104 (1): 64-69.
- DAVIDSON, J. & MPODOZIS, C., 1991.- Regional geological setting of epithermal gold deposits, Chile. *Economic Geology*, 86 (6) : 1174-1186.
- KARVINEN, W.O., 1981.- Geology and evolution of gold deposits, Timmins area, Ontario. Symposium: Genesis of Archean, Volcanic-Hosted Gold Deposits, Waterloo, 1981. Ed. E.G. Pyke & R.G. Roberts : 29-46.
- MELCHIOR, A., 1991.- Manejo de resultados de laboratorio en la interpretacion geoquimica de un area en estudio. Seminario interno sobre actualizacion de metodologia de analisis fisico-quimicos; 9-12/1/1991, Guachinango (Jal. Mexico).
- MELCHIOR, A., NEYBERGH, H., CARDENAS, J., NUNEZ ESPINAL, J., BASTIDA, R., BUVE, L. & DEJONGHE, L., 1991.- Exploration minérale par géochimie dans la région d'Arteaga (Michoacan, Mexique). Rapport final non publié du projet. *Consejo de Rec. Min. - Service Géol. Belg.*: 152 p.

NUNEZ ESPINAL, J., BASTIDA, J.R., MOTA MOTA, S., BUSTAMENTE, G., VELEZ LOPEZ, J., MENDOZA, A. & ZAPATA, G.R., 1988.- Geologia y geofisica del yacimiento ferrifero de Los Pozos, mpio. de Arteaga, Michoacan, Mexico. *Consejo de Recursos Minerales, IX seminario sobre exploracion geologica minera* : 399-433.

NUNEZ ESPINAL, J. & MELCHIOR, A., 1991.- Exploracion geoquimica para prospeccion por oro en el estado de Michoacan. Convencion sobre la evolucion geologica de Mexico; 23-28/6/1991. *Memorial del Congreso* : 137.

PYKE, D.R., 1981.- Relationship of gold mineralization to stratigraphy and structure in Timmins and surrounding area.

Symposium : Genesis of Archean, Volcanic-Hosted Gold Deposits, Waterloo, 1980. Ed. E.G. Pyke & R.G. Roberts : 1-15.

ROBERTS, R.G., 1981.- The volcanic-tectonic setting of gold deposits, Timmins area, Ontario. Symposium : Genesis of Archean, Volcanic-Hosted Gold Deposits, Waterloo, 1980. Ed. E.G. Pyke & R.G. Roberts : 16-28.

SILLITOE, H.R., 1991.- Gold metallogeny of Chile - an introduction. *Economic Geology*, 86 (6) : 1187-1206.

WINKLER, H.G.F., 1979.- Petrogenesis of metamorphic rocks, fifth edition, Springer-Verlag, NY Inc.: 348 p.