Correlations entre les mineralisations du Sud-Peruvien et les teneurs en elements traces des roches eruptives

Par Jean Amosse et Etienne Audebaud, Grenoble*)

Avec 8 figures et 1 tableau

Zusammenfassung

Die Analyse von verschiedenen Metallen (Cu, Zn, Pb, Ni, Co, V, Cr, Mo, Sb, Li, Rb) in magmatischen Gesteinen der süd-peruanischen Provinz zeigt eine Wechselbeziehung zwischen Geochemie und Lagerstättenbildung. Die Veränderungen der Gehalte folgen der Verteilung der entsprechenden Lagerstätten. Es folgt daraus, daß die Anden in zwei geochemische Provinzen einzuteilen sind. In der westlichen Provinz sind die Lagerstättenbildungen durch die Nazca Subduktion Platte kontrolliert; dieser Platte zugeordnet ist eine Einteilung in Zonen. In der östlichen Provinz haben die krustalen Aufschmelzungen einen sauren Charakter der Lagerstättenbildungen zur Folge. Eine weitere Teilung der östlichen Provinz in Zonen erklärt sich aus der Vertiefung der krustalen Aufschmelzungszonen in nördlicher Richtung.

Resumen

El estudio geoquemico de Cu, Zn, Pb, Ni, Co, V, Cr, Mo, Sb, Li, Rb, en rocas igneas del Sur-Este del Peru ha llegado a relacionar estos elementos en trazas y los yacimientos explotados. Las variaciones de contenido en elementos metallicos de ciertos tipos de rocas igneas siguen la abundancia de los indicios superficiales corespondientes. Consideraciones geoquemicas permiten dividir la Cordillera de los Andes en dos provincias de major importancia: una provincia oriental donde esta predominante el efecto del magmatismo relacionado a la subduction de la placa de Nazca, lo que induce una zonalidad transversal a los Andes; una provincia oriental donde zonas de fusion hundidas dentro de la corteza continental producen en general paragenesis de tipo acido y polimetalico.

Una zonalidad longitudinal a los Andes esta sobrepuesta a la precedente y se explica por el hundimiento progresivo de la zona de fusion hacia el Norte, entre Bolivia y el Peru del Sur.

Résumé

L'étude géochimique par dosages des éléments traces métalliques (Cu, Zn, Pb, Ni, Co, V, Cr, Mo, Sb, Li, Rb.) dans les roches éruptives du Sud-Péruvien a été menée afin d'établir une corrélation entre ces éléments traces et les minéralisations exprimées. Les variations des teneurs en éléments traces de certains types de roches suivent la répartition des gites métallifères correspondants. Des considérations géochimiques nous ont amené à diviser les Andes en deux provinces majeures, une province occidentale où dominent les effets du magmatisme en relation avec la subduction de la plaque de Nazca qui induit une zonalité transverse à l'orogène, et une province orientale où domine en revanche l'influence de zones de fusion crustales génératrices de minéralisations à dominante acide et poly-métallique. Une zonalité longitudinale à la chaîne andine se superpose à la précédente et s'explique par l'enfouissement graduel de la zone de fusion crustale vers le Nord.

^e) Adresses des auteurs: J. AMOSSE et E. AUDEBAUD, Institut Dolomieu, Géologie et Minéralogie, Rue Maurice-Gignoux, F-38031 Grenoble Cedex.

Abstract

The relationships between mineralisations in S-E Peru, and the eruptive country rocks have been studied by means of quantitative trace element determination (Cu, Zn, Pb, Ni, Co, V, Cr, Mo, Sb, Li, Rb). The variations of trace element content in the rocks is in good accordance with the repartition of the ore deposits. We have divided the Andean orogen in two principal provinces according to geochemical considerations: in the occidental one the Nazca plate subduction plays an important role in mineralizations zoning, but in the oriental one, the control of acid and poly-metallic mineralisations can be attributed to crustal fusion zones. Nevertheless, a longitudinal zoning appears in this zone and can be related to northward depth's increase of crustal fusion zone.

Краткое содержание

Чтобы подчеркнуть связь между геохимией и образованием залежей, провели анализ магматических пород южно-перуанской провинции на микроэлементы: Cu, Zn, Pb, Ni, Co, V, Cr, Mo, Sb, Li, Rb. Изменения содержания последних отображают соответствующие месторождения полезных ископаемых. Из этого следует, что Анды можно подразделить на две геохимические провинции. В западной провинции на образование месторождений полезных ископаемых влияет пластичность глыбы Nazca; здесь же замечается более мелкое подразделение на зоны разломов. В восточной провинции расплавление коры привело к появлению залежей кислого характера. Более мелкое подразделение, помимо, названного, в северной части этой провинции пытаются объяснить глубинным залеганием выплавлений в зоне коры.

Plusieurs études métallogéniques dont certaines études de synthèse ont été réalisées récemment dans la chaîne andine (BELLIDO et al. 1972, GABELMAN 1961, PON-ZONI et al. 1969, PETERSEN 1970, SILLITOE 1972). Ces différents auteurs ont tous mis en évidence un phénomène de répartition zonale des gîtes minéraux entre les zones adjacentes au Pacifique (zones internes de l'orogène) et les Cordillères proches du bassin amazonien (zones externes de l'orogène ou Cordillère orientale). Cette répartition zonale montre quand on se déplace des zones internes aux zones externes:

- des minéralisations de haute température (à magnétite dominante)
- des gîtes de type »Porphyry Copper« hypo à épithermaux
- des minéralisations plus froides méso à épithermales du type B. G. P.
- enfin des gisements le plus souvent épithermaux à antimoine dominant.

Les autres ont montré que le tracé des provinces métallogéniques suit dans ses grandes lignes la zonalité morphostructurale andine et les virgations de l'orogène (fig. 1).

Figure 1. — Schémas des zones morphostructurales et des provinces métallogéniques des Figure 1. — Schémas des zones morphostructurales et des provinces métallogéniques des Andes du Pérou. A: Arequipa, Ca: Cajamarca, Co: Cerro de Pasco, Cz: Cuzco, L: Lima, LP: La Paz, P: Potosi. 1: fosse Pérou-Chili, 2: limite de zone, 3: axe de la zone de fusion à (-30) — (-46) km de profondeur, 4: axe de la zone de fusion à (-9) — (12) km (d'après Aldrich et al., Schmucker et al.), 5: zone axiale de la chaîne hercynienne (d'après Mégard et al.), 6: massif d'Arequipa ou "plaque sud-péruvienne, 7: province de la cote ou du fer, 8: province cuprifère, 9: province à minéralisation polymétallique, 10: pro-vince de la Cordillère Orientale, 11: district stannifère et à minéralisations de haute températures; I: zone cotière, II: Cordillère Occidentale III a est b: zone intercordilléraine occidentale et orientale (Altiplano, IV: Cordillère orientale, V: zone subandine, VI: bouclier brésilier



J. AMOSSE et al. - Correlations entre les mineralisations du Sud-Peruvien



Figure 2. — Coupe dans les Andes Centrales au Nord et au Sud du 13° de latitude Sud; mise en relation des données géophysiques, géologiques et métallogéniques. 1: limite de l'orogène andin, 2: limite orientale de la province du fer, 3: limite orientale de la province du cuivre, 4: limites approximatives de la province "poly-métallique", 5: limite supérieure des minéralisations stannifères de type bolivien, 6: accumulation de cuivre densité 3,04, vitesse d'ondes sismiques 6,6; 9: couche de densité 2,57, vitesse d'ondes sismiques 4,9, (d'après Ocola et al.), 10: zone fortement minéralisée, 11: socle précambrien proche de l'affleurement, 12: batholites importants, 13: chevauchements principaux, 14: failles de décrochements, 15: composante SO-NE de la subduction de la plaque de Nazca sous les Andes, 16: apports magmatiques et minéralisations associées (cuivre ...) liées à la fusion de la plaque de Nazca, 17, 18 et 19: zones de fusion, 20: zone de fusion d'âge hercvnien (d'après Audebaud).

Pour expliquer cette répartition les raisons suivantes ont été avancées:

— la profondeur atteinte par l'entaille d'érosion dans le bâti andin (Goossens 1972);
— l'influence de structures tectoniques de grande amplitude;

— la lithologie générale de chaque zone paléogéographique (présence ou absence de sédiments carbonatés, évaporites) (PETERSEN 1970);

— la fusion de la plaque océanique dite de Nazca en subduction sous les Andes (MITCHELL 1972, 1973, SILLITOE 1972) (Figure 2);

- la remobilisation de la croûte continentale, soit par circulation de fluides hydrothermaux, soit par fusion anatectique des ses parties profondes (Figure 2);

Les deux premières raisons permettent d'expliquer outre certains faits de la zonalité générale, des anomalies au schéma que nous avons constatées dans le Sud péruvien.

En revanche les deux dernières propositions reflètent une explication beaucoup plus générale de la zonalité et mettent en jeu un vecteur magmatique dont les caractéristiques géochimiques peuvent refléter la nature des minéralisations qui les accompagnent. Pour rechercher une éventuelle liaison entre géochimie des magmas et minéralisations, nous avons pensé qu'il serait intéressant d'étudier la répartition des éléments traces dans les roches intrusives d'origine magmatique situées dans le même contexte que ces minéralisations.

II --- Etude experimentale

1) Prélèvement et identification des échantillons

Le prélèvement des échantillons appuyé sur un relevé géologique régional a été effectué dans la Cordillère orientale, l'Altiplano, et la Cordillère du Sud-Est du Pérou entre les latitudes de 13° 30 et 15° Sud le long d'un profil SO-NE transversal à l'orogène andin (fig. 3). Les âges des roches que nous avons prélevées sont variés mais en général compris entre l'oligocène et le plioquaternaire. Néanmoins quelques roches ont un âge permien.

A quelques exceptions près, les roches, non altérées, n'ont pas été prélevées au voisinage de gîtes minéraux connus, ce qui aurait risqué de modifier le fond géochimique normal. Toutes les roches ont préalablement été étudiées et déterminées sur le plan pétrographique et minéralogique par examen de lames minces et analyse des éléments majeurs (AUDEBAUD et al. 1974).



Figure 3. — Schéma de mise en place d'échantillonnage. 1: Volcanites du district de Marcapata-Corani, 2: Volcanites et roches intrusives de la Cordillère Orientale, 3: Volcanites de l'Altiplano, 4: Volcanites permiennes, 5: Volcanites de l'Altiplano et de la Cordillère Occidentale, 6: Roches plutoniques (massifs principaux), 7: Axe de la zone de fusion à —10 km, 8: Axe de la zone de fusion profonde, 9: Discontinuité paléogéographique et structurale maj eure de l'Altiplano: zone de Santa Lucia-Sicuani, 10: Axe des abscisses des diagrammes, 11: Limite des deux provinces géochimiques occidentales et orientales des Andes péruviennes, (cf. conclusions).

2) Préparation des échantillons

Une quantité de roche de l'ordre de 50 g a été prélevée après quartage et broyée dans un mortier à billes d'oxyde de zirconium pour éviter toute pollution. Avant chaque opération, nous avons nettoyé le mortier en effectuant un broyage de verre puis de la roche à analyser, fraction systématiquement rejetée. Dans le cas où l'échantillon présentait des phénocristaux la masse soumise au broyage a été augmentée afin d'être représentative de l'ensemble.

3) Méthode de dosage

Les éléments dosés sont Cu, Pb, Zn, Ni, Co, V, Cr, Rb, Li, Mo, Sb.

Une prise de 2 g de la roche à analyser est attaquée dans une coupelle en téflon par un mélange d'acides sulfurique et fluohydrique jusqu'à fumées blanches sulfuriques. On reprend à chaud par de l'acide chlorhydrique 6 N. On met en ballon jaugé de 100 cc et on complète avec de l'eau. Les éléments sont alors dosés par spectrophotométrie d'absorption atomique.

Cu, Pb, Ni, Co, V, Cr, Mo, Sb sont à l'exception de quelques roches où les teneurs sont trop élevées, dosés directement sur la solution obtenue après attaque sans dilution préalable. Les autres éléments sont dosés sur ces solutions diluées 5 fois.

Les interférences dûes à l'effet de matrice sont compensées par la méthode des additions standards. Quant aux absorptions non atomiques qui peuvent apparaître avec des solutions très chargées en éléments étrangers (Fe, Al, Mg) et pour des longueurs d'onde de résonnance situées dans l'U. V., elles sont mesurées avec une lampe à hydrogène à fond continu. La validité de la technique analytique utilisée pour cette étude a été testée préalablement à l'aide de roches étalons (standards internationaux). Les seuils de détection estimés et indiqués dans le tableau I sont systématiquement supérieurs au seuil de détection réel. Ces seuils de détection ont été choisis pour que l'erreur soit dans ce cas inférieure à 25 %. Mais la précision obtenue pour des valeurs supérieures à ces seuils augmente très rapidement avec la teneur.

III — Resultats experimentaux

Les résultats expérimentaux sont consignés dans le tableau I. Nous avons porté successivement: le numéro de prélèvement sur le terrain, l'abscisse, l'âge, la nature pétrographique et les valeurs en ppm des différents éléments dosés.

L'abscisse linéaire kilométrique permet de positionner chaque échantillon sur un axe ayant pour origine l'extrême ouest de l'orogène, que nous avons fixé comme les géophysiciens à l'intersection de notre coupe avec la fosse Pérou-Chili. Les points de prélèvements ne se trouvant pas tous sur la ligne transverse, nous avons projeté les points hors coupe sur celle-ci, parallèlement à l'axe de l'orogène.

La limite de détection obtenue pour chaque élément est donnée en tête de tableau. Les résultats inférieurs à cette limite sont symbolisés par un tiret.

L'exploitation de ces résultats expérimentaux est effectuée en traçant, pour les éléments significatifs, les courbes de variation des teneurs en fonction de la distance en kilomètres au point de référence zéro (fosse Pérou-Chili).

Nous n'avons reporté les points significatifs que pour le cuivre (fig. 4) et le rubidium (fig. 5) pour alléger la présentation. Sur ces deux diagrammes, les différentes roches sont figurées par des signes données en légende correspondant à leur nature pétrographique.

Cuivre

Nous avons pu dans ce cas (fig. 4) tracer trois courbes de variation correspondant à trois types de roches d'acidités différentes. La première droite tracée en prenant les moyennes des teneurs en Cu des roches les plus basiques montre un fort gradient de concentration négatif quand on se déplace vers l'Est. Les roches acides (rhyolites, granites) présentent des teneurs faibles et ne montrent en outre, aucune variation le long du profil considéré. Il est intéressant de noter que les roches intermédiaires (latites) s'intercalent très exactement entre les droites précédentes. Un groupe de points correspondant tous à des roches d'âge miocène émises en une zone bien définie de l'Altiplano, présente une anomalie positive très forte qui s'écarte de la régression linéaire obtenue pour les autres résultats. De plus, une rhyolite et une spilite de l'extrême Est sont riches en cuivre. On notera la présence à proximité de gisements exploités (Cu, Zn, Sb). La même explication s'applique à la spilite permienne EA-138 en relation avec un filon de cuivre. A l'extrême ouest de l'orogène deux roches du même type présentent des valeurs très différentes l'une de l'autre. Ce fait n'est pas pour surprendre si l'on se réfère aux résultats obtenus au



Figure 4. — Courbes de variation des teneurs en cuivre dans les roches éruptives acides (— — — —) basiques (— — —) et intermédiaires (- — - —) Les triangles a, b, c, symbolisant respectivement les moyennes de 13, 11, et 3 roches »andésitiques« prélevées sur un profil distant de 100 km au sud-est de notre profil de référence (d'après Andriambololona et Lefèvre, 1976)



Figure 5. - Courbe de variation des teneurs en rubidium dans les roches éruptives acides.

Chili par PICHLER et al. (1970), El HINNAWI et al. (1969), SIECERS et al. (1969), FER-NANDEZ et al. (1972), HÖRMANN et al. (1973), qui ont observé le même phénomène dans les zones cuprifères où les variations de teneurs entre des roches pétrographiquement voisines sont très fortes. La moyenne générale restant élevée. La même remarque est valable pour les échantillons 70—31 et 70—40.

Zinc

On a pu tracer pour cet élément (fig. 6), une courbe pour les roches acides et une pour les roches basiques. Si cette dernière montre une valeur moyenne élevée, en revanche aucun gradient de concentration n'apparaît. Toutefois, la dispersion des valeurs augmente quand on se rapproche de la zone zincifère.

La courbe relative aux roches acides possède au contraire un gradient positif dans la direction O--E, surtout sensible à partir de l'Altiplano.

Plomb

Les courbes obtenues pour le plomb (fig. 6) présentent les mêmes variations de

gradient. Toutefois, dans ce cas, les teneurs en métal des roches basiques sont plus faibles que celles des roches acides.



Figure 6. — Courbes de variation des teneurs en zinc et en plomb dans les roches éruptives acides et basiques.

Nickel-Cobalt

Les courbes relatives au nickel et au cobalt sont reportées sur le même diagramme (fig. 7) avec les mêmes échelles. Ces deux éléments s'associent uniquement aux roches basiques et présentent un gradient positif quand on se déplace vers les zones externes de l'orogène. On remarquera que le gradient de la courbe nickel est plus fort que celui de la courbe cobalt. Il en résulte une augmentation du rapport Ni/Co dans la direction Ouest-Est. Ce fait a déjà été noté par WRIGHT (1973) pour d'autres orogènes circumpacifiques.



Figure 7. — Courbes de variation des teneurs en nickel et cobalt dans les roches éruptives acides et basiques.

Vanadium

Des valeurs très dispersées et souvent fort élevées semblent caractériser la géochimie de cet élément et il n'est donc pas possible d'observer un quelconque gradient entre les teneurs de l'Est et de l'Ouest. Le vanadium semble toutefois lié plus particulièrement aux roches basiques. L'anomalie miocène trouvée précédemment pour le cuivre semble réapparaître ici.

Chrome

Cet élément présente également des valeurs très dispersées. L'étude pétrographique des roches à valeurs élevées a toujours montré la présence d'olivine. On notera en outre, ce qui est habituel, que le chrome a des valeurs très faibles dans les roches acides.

Molybdene-Antimoine

Nous avons dosé le molybdène pour déceler une corrélation entre sa teneur dans les roches et sa présence signalée dans le Porphyry-Copper de l'Ouest. Néanmoins les faibles teneurs relevées ne permettent d'établir aucune corrélation et ne justifient pas le tracé d'un diagramme.

En revanche, l'antimoine a montré trois anomalies dans des rhyolites et une spilite. L'une de ces rhyolites montre d'ailleurs une minéralisation en stibine disséminée et est en outre, accompagné d'un cortège filonien de ce minéral. Ces anomalies sont d'âge pliocène et localisées dans la Cordillère orientale.

Lithium-Rubidium

Alors que le lithium (fig. 8) semble lié indifféremment aux roches acides et aux roches basiques, en revanche le rubidium (fig. 5) s'intègre essentiellement aux



J. AMOSSE et al. --- Correlations entre les mineralisations du Sud-Peruvien

Figure 8. — Courbe de variation des teneurs en lithium dans les roches éruptives acides et basiques.

roches acides. En outre, comme nous l'avons déjà constaté dans le cas du zinc et du plomb on observe une rapide augmentation des teneurs moyennes lorsque l'on passe de l'Altiplano à la Cordillère orientale.

IV — Discussion

1) Zonéographie générale

D'après les résultats expérimentaux, on observe pour les éléments étudiés deux types différents de comportement:

- des éléments à variation continue de teneurs entre l'Est et l'Ouest avec un gradient positif (Ni, Co) ou négatif (Cu).

--- des éléments dont le gradient de concentration pratiquement nul à l'Ouest augmente brusquement au passage à l'Altiplano.

L'examen des résultats montre que pour le cuivre, il existe une corrélation entre le gradient de répartition des gîtes tout le long de la coupe effectuée et le gradient des teneurs dans les roches les plus basiques.

Le nickel et le cobalt montrent un gradient cette fois-ci positif entre l'Ouest et l'Est et également continu. Les rares gîtes existant se trouvent d'ailleurs dans le Cordillère orientale, là ou les teneurs moyennes sont les plus fortes.

On peut donc avancer que ces minéralisations en cuivre, nickel, et cobalt d'une part et le complexe igné basique d'autre part, ont une parenté magmatique.

En outre, on constate qu'il existe une dissymétrie dans la répartition géochimique de ces éléments entre l'est et l'ouest de la chaîne.

Cette dissymétrie géochimique ne peut-être mise en relation géométrique qu'avec un type de dissymétrie de même ordre qui dans ce cas serait la présence de la subduction de la plaque de Nazca sous les Andes, hypothèse d'ailleurs avancée par

SILLITOE (1972), pour expliquer l'ensemble de la zonalité andine. La province des gîtes de cuivre du type »porphyry-copper« est d'ailleurs une des seules provinces métallogéniques andines qui soit rigoureusement parallèle à la fosse Pérou-Chili.

Quant à l'anomalie miocène relevée dans l'Altiplano, elle peut s'expliquer de deux façons. D'une part, par un plan de Bénioff dont la pente au miocène aurait été inférieure à sa pente actuelle et d'autre part, par l'ouverture d'un rift provoquant la remontée de laves basiques profondes enrichies en cuivre. En l'état actuel des recherches en cours la deuxième hypothèse semble la plus probable (VIVIER et al, 1976).

Le zinc est un des éléments dont le gradient de concentration augmente brusquement dans les roches acides au passage entre l'Altiplano et la Cordillère orientale. Le gradient relatif aux roches basiques est nul. Ce fait est d'autant plus intéressant que la teneur moyenne de ces roches est très supérieure à celle des roches acides. Nous pensons que le zinc est retenu dans le réseau des minéraux de ces roches basiques par substitution au magnésium. Il n'en demeure pas moins que la présence des gisements de ce métal ne peut-être corrélée qu'avec les roches acides, du fait de l'existence d'un gradient dont l'augmentation est liée à la fréquence des gisements. Des études en cours nous permettront d'ailleurs de préciser cette relation. Ce fait se retrouve dans le cas du plomb, lié sur le plan métallogénique au zinc, toutefois dans ce cas les teneurs des roches basiques en plomb sont faibles car le métal ne peut-être retenu dans le réseau des minéraux constitutifs de ces roches.

Une augmentation brusque du gradient de concentration au passage Altiplano cordillère orientale caractérise également la géochimie du lithium et du rubidium. Le lithium lié indifféremment aux roches acides et basiques ne semble pas devoir être un indicateur spécifique d'un type de minéralisation. Une variation du gradient de concentration du rubidium nous semble plus intéressante car cet élément caractérise la nature acide des minéralisations.

En effet, outre le plomb et le zinc déjà mentionnés, le caractère acide se retrouve dans des minéralisations à antimoine, bismuth, tungstène et or, qui apparaissent, elles aussi, dans la partie orientale de l'orogène. On peut donc dès à présent séparer sur le plan géochimique, cet orogène en deux provinces principales. Une province Ouest caractérisée par la variation continue des teneurs en Cu, Ni, Co dans les roches et une province Est caractérisée par la présence de minéralisations essentiellement acides et d'un gradient géochimique des éléments liés à ces minéralisations (Rb, Li, Zn, Pb).

La zone de transition fondamentale entre les deux provinces que nous venons de définir passe donc par l'Altiplano. Elle correspond sur le plan structural à la présence des grandes fractures longitudinales séparant un domaine occidental caractérisé par un socle précambrien et un domaine oriental où le socle a été déformé à l'Hercynien. La zone située entre les deux domaines (Altiplano) est occupée par d'épaisses séries molassiques tertiaires et a été l'objet au permien de déformations du type »rift«. C'est dans cette zone que commencent à apparaître les minéralisations zincifères et plombifères.

Il est donc évident que vont se manifester dans la province orientale des anomalies à un schéma de zonalité qui serait fondé exclusivement sur la présence de la zone de subduction. D'ailleurs c'est vers la limite de ces deux provinces qu'ont été mise en évidence, par la sismique et par des études de conductivité électrique,

des »zones de fusion« profondes (OCOLA et al. 1972 et 1973, SCHMUCKER et al. 1966, ALDRICH et al. 1972), ce caractère acide des minéralisations s'explique ainsi par la remobilisation de la croute, conséquence de ces zones de fusion. Cette tendance est encore amplifiée plus à l'Est par l'existence de la zone axiale de la chaîne hercynienne à l'aplomb de la Cordillère orientale. Beaucoup de minéralisations de cette province apparaissent comme tardives (pliocènes) ce qui les oppose aux minéralisations de l'Ouest de l'orogène (SILLITOE, 1968). C'est le cas du gisement de plomb de Corani interstratifié dans la base d'ignimbrites datée de 4,5 M. A. (BAR-NES et al. 1970).

Dans la province orientale, la primauté de l'influence des »zones de fusion« profondes sur celle de la subduction océanique peut-être, en outre mise indirectement en évidence en considérant que l'augmentation de la pente du plan de Benioff entre le Nord et le Sud du Pérou (JAMES, 1971) devrait s'accompagner d'un resserrement de la zonéographie métallogénique au sud du pays alors que l'on assiste au phénomène inverse pour les provinces métallogéniques les plus orientales (fig. 1 et fig. 2).

2) Zonéographie de la province occidentale

La zonéographie de la province occidentale est caractérisée par les deux districts définis par les auteurs déjà cités.

 un district proche de la fosse Pérou-Chili où abonde le fer de haute température;
un district plus éloigné de la fosse mais toujours parallèle à celle-ci type « porphyry-copper ».

La province est aussi caractérisée par des éléments pour lesquels le gradient géochimique est constant d'Est en Ouest (Cu, Ni, Co): c'est dans cette province que les effets de la subduction se font le plus directement sentir.

3) Zonéographie de la province orientale

Cette province est caractérisée surtout par la présence de minéralisations acides souvent épithermales. C'est le cas, par exemple du gisement de wolframite de Chimboya. La minéralisation tungstifère épithermale y recouvre une minéralisation antérieure à stibine liée à une rhyolite. On y rencontre, en outre, de nombreux petits districts qui s'ordonnent mal avec le schéma de la zonalité classique (districts aurifères, districts antimonifères). En particulier, il apparaît au sud c'est-à-dire en Bolivie du nord des minéralisations stannifères à fort gradient thermique (TURNEAURE 1960) qui s'expliquent par la présence des zones de fusion profondes d'âges très divers que nous avons signalées.

Ces minéralisations stannifères, abondantes en Bolivie disparaissent graduellement au Pérou pour laisser place à des minéralisations plus froides. Nous pouvons donc définir une zonalité longitudinale propre à la cordillère orientale s'expliquant par l'enfouissement vers le nord de la zone de fusion crustale inférieure qui, suivant les données de la géophysique (OCOLA et al. 1972) passe de 35 km de profondeur en Bolivie à 40 km au Pérou. Cette théorie n'exclut pas celle fondée sur l'existence d'une province stannifère lieé à une chaîne précambrienne remobilisée (SCHUILING 1967). Dans cette province complexe apparaissent aussi des zonalités dûes à des facteurs locaux:

zonalités liées à des intrusions (fer métasomatique de Livitaca),

— influence des linéaments structuraux qui orientent le magmatisme et les minéralisations associées; l'antimoine et le plomb sont bien souvent liés à un magma-

tisme remonté par des failles Nord-Sud apparues au pliocène lors du jeu dextre des grands décrochements longitudinaux aux Andes.

— zonalité liée à la profondeur de l'entaille d'érosion du bati andin (GOOSENS 1972) certaines minéralisations chaudes comme le bismuth et le cuivre de Marcapata semblent pouvoir s'expliquer de cette façon, en remarquant que la position de ce gisement est à une altitude de 2000 m inférieure à celle des gîtes habituels de la Cordillère orientale.

Nous noterons en outre, à la limite crétacé-éocène, la présence de gîtes de cuivre importants interstratifiés dans ces couches rouges et qui représentent le remaniement de gîtes d'origine magmatiques situés en Cordillère occidentale.

Ce phénomène échappe évidement à toute action magmatique directe et il est le résultat d'un processus syngénétique dont l'importance a été soulignée par Amsrurz (1960).

V — Conclusion

Cette étude, fondée sur l'analyse des éléments traces de 55 roches permet d'établir néanmoins des corrélations très nettes entre les teneurs de ces éléments traces et les minéralisations. Le fait que les éléments (Cu, Ni, Co) ou (Rb, Li, Pb, Zn) généralement liés sur le plan géochimique présentent un comportement similaire ajoute à la valeur statistique de l'ensemble.

Nous avons pu montrer ainsi que tous les types de zonalité avancés par les auteurs pour expliquer la répartition zonale des gîtes métallifères interviennent à des titres divers et à des échelles différentes. Néanmoins, la liaison des gîtes qui est apparue avec les teneurs en éléments traces des roches du complexe éruptif, nous a permis d'isoler les facteurs dominants, à savoir:

— la subduction de la plaque de Nazca d'où dérivent les minéralisations chaudes et précoces de la moitié occidentale de l'orogène.

- les zones de fusion crustales révélées par la géophysique et génératrices de minéralisations à dominante acide et à mise en place polyphasée, la dernière mise en place étant pliocène.

Nous définissons donc seulement deux provinces géochimiques, conséquence l'une et l'autre de phénomènes géophysiques majeurs. Elles correspondent à une division de l'orogène andin en deux grandes zones, l'une occidentale à socle précambrien relativement stable et exempt d'orogènése hercynienne, l'autre orientale à socle hercynien remobilisé à l'andin.

Entre ces deux zones l'Altiplano apparaît comme une zone mobile où les phénomènes de distension (tertiaires et permiens), les failles de décrochement longitudinales, (pliocène et miocène) les effets maxima de compressions (oligocène et pliocène) se situent en un point privilégié de l'orogène, là où la géophysique a justament mis en évidence la position actuelle de la zone de fusion crustale que nous avons pu localiser au permien à l'extrême Est de l'orogène. Une discontinuité entre deux domaines géochimiques et métallogéniques différents correspondrait donc à l'affrontement entre deux domaines structuraux différents.

Quand PETERSEN (1970) liait la répartition des minéralisations à l'existence de deux domaines l'un mio, l'autre eu-géosynclinal, il aboutissait par des voies tout à fait différentes à une division analogue à la nôtre.

					(Vale	urs en pp	(m)							J. 1
Eléments				Cu	Zn	Pb	Ņ	Co	Λ	പ്	Мо	\mathbf{Sb}	Iri	Rb
Limites de	e détection			2	5	9	4	4	10	4	4	25	3	<u>"</u>
Numéro	Abscisse	Age	Nature											
70-5	125	Tertiaire	diorite	225	120	22	15	11	233	22	4		10	9,0
70-6	125	Tertiaire	diorite	13	138		20	28	730	55	. 1	I	99	۲ ۲
EA-174	195	Tertiaire	diorite	22	98	22	l	19	178	1		1	3 =	32
70–29	225	Pliocène	rhyolite	7	37	25	Í	8	20	1	1	ł	15	13
70–31	265	Pliocène	andésite	230	118	17	15	31	226	24	-0	[İ۹	12
70–32	270	Pliocène	andésite	76	93	25	1	27	143	ŝ	, un	Ì	5	138
70–33	275	Pliocène	latite	40	126	17	27	20	118	55	, nu	ł	15	35
70–34	280	Pliocène	rhyolite	ŝ	49	30	1	ľ	ł	ļ		i	18	226
70–35	285	Pliocène	andésite	98	106		105	13	163	200	1	ļ	153	100
70-40	295	Pliocène	andésite	36	105	I	62	19	171	134	i	ł	10	j 🏾
EA-31	355	Pliocène	and. bas.	72	104	17	100	62	245	189]	ł	5	84
EA-32	355	Pliocène	spilite	60	112	24	31	19	150	23	9		37	122
EA-29	355	Pliocène	trachyte	2	68	ĺ	I	9	80	[4	ł	4	190
EA-161	370	Miocène	rhyolite	18	164	21	7	ŝ	35	7	ŝ	1	24	152
EA-158	375	Pliocène	diorite	14	46		17	24	185	11	l	ł	1	47
EA-159	375	Tertiaire	andésite	135	192	22	50	40	206	68		ł	32	126
EA-85	380	Miocène	granite	5	37	17	28	24	75	22		I	22	6
EA-88	380	Miocène	gabbro	150	116	21	33	53	335	27		1	14	110
EA-96c	380	Miocène	téphrite	215	106	25	68	73	350	106	1	ł	34	27
EA-96d	380	Miocène	phonolite	130	116	47	20	30	240	17		1	26	06
EA-89	385	Pliocène	rhyolite	'n	50	34	4	9	10	ļ	I	1	104	173
EA-58	390	Tertiaire	and. bas.	52	130	17	129	51	210	506	ł	1	124	89
EA-74	390	Tertiaire	and. bas.	41	106	17	145	60	220	339	1	l	16	22
EA-101	390	Pliocène	rhyolite	6	49	21	6	9	25	6	ł	1	49	166
EA-133	395	Miocène	and. bas.	270	117	15	15	42	286	49	1	1	72	35
EA-154	397	Pliocène	and, bas.	51	112	12	174	42	212	589	9	ł	40	23
EA-155	397	Pliocène	rhyolite	4	20	28	4	1	12	1	l	1	5	218

Tableau I

J. AMOSSE et al. — Correlations entre les minera	alisations du	Sud-Peruvien
--------------------------------------------------	---------------	--------------

					Table	au I (su	uite)							
Eléments				C	Zn	Pb	Ż	S	Λ	Ľ	Mo	Sb	Li	R?
Limites de	e détection			2	5	6	4	4	10	4	4	25	3	5
Numéro	Abscisse	Age	Nature											
EA-156	397	Pliocène	latite	19	71	27	89	16	150	202	9	I	16	243
EA-152	400	Pliocène	rhyolite	1	94	37	l	ļ	73	!	4	1	19	172
EA-166	400	Pliocène	latite	26	76	25	34	15	83	64			37	91
EA-146	400	Tertiaire	andésite	5	59	25	10	ŝ	50	10	1	1	99	48
EA-148	400	Tertiaire	andésite	23	68	25	8	6	214	23	9	l	7	10
EA-54	402	Oligocène	trachyte	17	70	45	4	ŝ	70	ł	Ì	1	21	342
EA-65	405	Tertiaire	andésite	24	47	24	58	19	100	59	ļ]	62	63
EA-117	405	Tertiaire	latite	40	100	œ	61	29	100	41	4	l	19	69
EA-143	405	Pliocène	rhyolite	υ	48	27	4]	14	I]	25	9	185
EA-145	405	Tertiaire	Monzonite	14	56	25		12	113	ļ	4]	17	104
70–168	410	Oligocène	trachyte	34	98	24	7	11	115	11	l		17	109
EA-76	410	Permien	spilite	11	110	17	74	67	275	356]	I	83	ļ
EA-78	410	Permien	rĥyolite	Ι	59	Ι	17	ŝ	95	24	1	1	69	165
EA-150	415	Oligocène	granite	9	120	30	8	ŝ	ļ				52	198
EA-151	415	Oligocène	granite	7	73	30	4	80	15	ŝ	I		36	144
EA-37	415	Tertiaire	monzonite	6	88	21	23	15	80	53	4	I	96	145
EA-138	420	Permien	spilite	555	685	20	20	36	146	68	l	1	41	1
EA-140	420	Permien	rhyolite	4	50	20		9	20	7	I	1	13	204
N-182	420	Quaternaire	latite	18	127	45	73	31	107	193	9	ļ	78	187
N-94	450	Pliocène	rhyolite	9	75	30	30	11	40	36]	1	266	303
N-104	450	Pliocène	latite	14	81	68	95	21	50	208	1]	182	444
N-119	455	Permien	phonolite]	395	24	I	l	22	l	ŝ	1	218	78
N-126	465	Pliocène	granite	7	80	70	32	9	15	56	I	ļ	567	409
OA-45	475	Pliocène	rhyolite	ŝ	11	52	I	I	23		1	1	190	327
C-5	505	Pliocène	rhyolite	33	125	57	150	38	80	189	ŝ	280	184	368
C-14	505	Tertiaire	spilite	85	173	58	84	53	264	151	4	43	76	81
K-7	525	°	diorite	13	138	22	1	21	69	6	œ	I	76	89
70 - 160	525	<u>ი</u> .	diorite	37	131	17	6	43	303		l		12	25

268

Remerciements

Les auteurs remercient Monsieur le Professeur GIRAUD d'avoir bien voulu relire le manuscrit. Ils remercient toutes les personnes qui ont permis la réalisation de ce travail sur le terrain, en particulier le Servicio de Geologia y Mineria del Peru, le Centre National de la Recherche Scientifique (RCP 132), et les directeurs et Ingénieurs des mines citées dans le texte (Chimboya, Corani, Kori Illa, Marcapata, Sicuani...).

Bibliographie

- ALDRICH, L. T., CASAVERDE, M., SALGUEIRO, R., BANNISTER, J., VOLPONI, F., DEL POZO, S., TAMAYO, L., BEACH, L., RUBIN, D., QUIROGA, R., TRIEP, E.: Carnegie Institution Year book, 71, 317–320, 1972.
- AMSTUTZ, G. C.: El origen de depositos minerales congruentes en rocas sedimentarias Bol. Soc. Geol. Peru, 36, 5—30, 1960.
- ANDRIAMBOLOLONA, R. D.: Les éléments de transition dans les suites andésitiques et shoshonitiques du Sud du Pérou. Thèse. Montpellier. 1976.
- AUDEBAUD, E.: A propos d'une zone de haute conductivité électrique: différences géologiques et géophysiques entre le N et le S du Pérou C. R. Acad. Sc. Paris, 277, ser. D, 1729—1732, 1973.
- —, LAUBACHER, G., MAROCCO, R.: Coupe géologique des Andes du Pérou de l'Océan Pacifique au Bouclier brésilien — Geol. Rundsch., 65, 1, 223—264, 1976.
- —, VATIN-PERICNON, N.: The volcanism of the northern part of peruvian Altiplano and of the oriental Cordillera on a traverse Quincemil-Sicuani-Arequipa — Proceedings of the Symposium on "Andean and Antarctic volcanology problems", Santiago, Chile, september 1974.
- BARNES, V. E., EDWARDS, G., MCLAUGHLIN, W. A., FRIEDMAN, I., JOENSU, O.: Macusanite occurence, age and composition, Macusani, Peru — Geol. Soc. Amer. Bull., 81, 1539– 1546, 1970.
- BELLIDO, E., DE MONTREUIL, L.: Aspectos generales de la metalogenia del Peru Geol. Economica, 1, 1—149, 1972. Avec carte au 1/2.500.000 par Bellido, E., GIRARD, D., PAREDES, J.
- EL HINNAWI, E., PICHLER, H., ZEIL, W.: Trace element distribution in Chilean ignimbrites — Contr. Miner. Petr., 24, 50—62, 1969.
- FERNANDEZ, A., HÖRMANN, P. K., KUSSMAUL, S., MEAVE, J., PICHLER, H., SUBIETA, T.: First petrologic data on young volcanis rocks of SW-Bolivia — Tscherm. Min. Petr. Mitt., 19, 149—172, 1972.
- GOOSSENS, P. J.: Metallogeny in Equatorian Andes Econ. Geol., 67, 458-468, 1972.
- HÖRMANN, P. K., PICHLER, H., ZEIL, W.: New data on the young volcanism in the Puna of N-W-Argentina-Geol. Rundsch., 62, 2, 397-418, 1973.
- ISACKS, B., MOLNAR, P.: Distribution of stresses in the descending lithosphère from a global survey of focal mecanism solutions of mantle earthquakes — Rev. of Geoph. and Space Physics, 9, 103—174, 1971.
- JAMES, D.: Plate Tectonic model for the evolution of a Central Andes Geol. Soc. Amer. Bull., 82, 3325—3346, 1971.
- Mégard, F., Dalmayrac, B., Laubacher, G., Marcoco, R., Martinez, C., Paredes, J., Tomasi, P.: La chaine hercynienne au Pérou et en Bolivie: premiers résultats — Cah. Orstom, Ser. Geol. III, 1, 5—44, 1971.
- MITCHELL, A. H. G.: Metallogenic belts and angle of dip of Benioff zones Nature Phys. Sc., 245, 49—52, 1973.

- —. GARSON, M. S.: Relationship of Porphyry Copper on circumpacific tin deposits to paleo — Benioff zones — Trans. Inst. Min. Metall. B, 10—24, 1972.
- Ocola, L., MEYER, R. P.: Crustal low-velecity zones under the Peru-Bolivia Altiplano Geophys. J. R. Astr. Soc., 30, 199–209, 1972.
- -: Crustal structure from the Pacific basin to the Brazilian shield between 12° and 30° south latitude -- Geol. Soc. Amer. Bull. 84, 3387-3404, 1973.
- PETERSEN, U.: Metallogenic provinces in south America Geol. Rundsch., 59, 884—897, 1970.
- PICHLER, H., ZEIL, W.: Chilean "andesites". Crustal or mantle derivation. Upper Mantle Symposium, Buenos-Aires, 361-371, 1970.
- PONZONI, E., POSTIGO, A., BIRBECK, J.: Mapa metallogenetico del Peru Soc. Nac. de Mineria y Petroleo, Lima, 1969.
- SCHMUCKER, U., FORBUSH, S. E., HARTMANN, O., GIESECKE, A. A., CASAVERDE, M., CASTILLO, J., SALGUEIRO, R., DEL POZO, S.: Electrical conductivity anomaly under the Andes — Carnegie Inst. of Washington Year book, 65, 11–28, 1966.
- SCHUILING, R. D.: Tin belts on the continents around the Atlantic Ocean. Econ. Geol., 62, 540—550, 1967.
- SIEGERS, A., PICHLER, H., ZEIL, W.: Trace element abundances in the "andesite" formation of northern Chile. Geochim. Cosmoch. Acta, 33, 882—887, 1969.
- SILLITOE, R. H., MORTIMER, C., CLARK, A. H.: Chronology of landform evolution and supergene mineral alteration, southern Atacama desert, Chile. — Chile Inst. Min, and Met. Trans., 77, 165—169, 1968.
- —, Relation of metal provinces in western America to subduction of oceanic lithosphere.
 Geol. Soc. Amer. Bull., 83, 813—818, 1972.
- TURNEAURE, F. S.: A comparative study of major ore deposits of central Bolivia. Econ. Geol., 55, 2 & 3, 217—254, 574—606, 1960.
- WRIGHT, J. B., MCCURRY, P.: Magmas, mineralization, and sea-floor spreading Geol. Rundsch., 62, 1, 116–125, 1973.
- VIVIER, G., VATIN-PERIGNON, N., AUDEBAUD, E.: Le magmatisme tardi-hercynien et andin le long d'une transversale sud-péruvienne. Bilan géochimique des éléments incompatibles. — Réunion ann. Sc. de la Terre, Paris, 396, 1976.

A Precambrian Core Sample from the Altiplano/Bolivia

By Bernd LEHMANN, Berlin *)

With 1 figure and 4 tables

Zusammenfassung

In einem Bohraufschluß vom Altiplano in Bolivien wurde in 2.744 m Teufe unter tertiärer und kretazischer Bedeckung das präkambrische Basement angetroffen. Der präkambrische Bohrkern besteht teils aus Hornblende-Meta-Granit (Hornblende-Kalifeldspat-Quarz-Plagioklas-Gneis), teils aus Biotit-Meta-Granit (Biotit-Kalifeldspat-Quarz-Plagioklas-Gneis). Nach Rb-Sr Datierung dürfte das Bildungsalter etwa 1.050 \pm 100 my betragen, eine Aufheizungsperiode um 530 \pm 30 my ist nach K-Ar Analyse zu vermuten.

^{*)} Address of author: Bernd LEHMANN, Institut für Angewandte Geologie der Freien Universität Berlin, Wichernstr. 16, D-1000 Berlin 33.