

## ANALYSES PARAGENETIQUES ET STRUCTURALES DES GISEMENTS DE SAN MATIAS ET CAPILLANI (TOROPALCA - POTOSI, BOLIVIE)

Frédéric BRODKOM<sup>1</sup>, Benoît JARDON<sup>2</sup>, Sophie WARNY<sup>3</sup> & Jean VERKAEREN<sup>4</sup>

(6 figures & 2 planches)

1. Adresse actuelle : Centre Technologique International de la Terre et de la Pierre, Chaussée d'Antoing 55, B-7500 Tournai.

2. Adresse actuelle : Avenue Peltzer 37, B-4800 Verviers.

3. Adresse actuelle : U.C.L., Unité de Paléontologie et de Paléogéographie, Place L. Pasteur 3, B-1348 Louvain-la-Neuve.

4. U.C.L., Laboratoire de Géologie et Minéralogie, Place L. Pasteur 3, B-1348 Louvain-la-Neuve.

**RESUME.** Des analyses paragenétiques et structurales des filons minéralisés d'âge tertiaire de San Matias et Capillani (Potosi, Bolivie) ont été menées afin de préciser les liens entre minéralisations (Zn-Pb-Ag) et les déformations tectoniques. Dans ce secteur sud de la Cordillère andine orientale, l'évolution orogénique a permis la rotation progressive de l'axe de contrainte responsable des failles et cisaillements par lesquels les fluides hydrothermaux ont circulé à faibles T°. Deux phases majeures de déformation et minéralisation ont été identifiées : (1) un cisaillement dextre durant lequel la sphalérite et la gangue de quartz-sidérite ont cristallisé à la faveur de failles NE-SW à NNE-SSW en réouverture, et (2) un cisaillement sénestre durant lequel la galène s'est déposée à la faveur de caissons prismatiques en ouverture suivant des fractures NNE-SSW prises en relais par des segments N-S. Enfin, il a été reconnu une troisième phase de minéralisation, surtout argentifère, et des structures post-minéralisations comme des décrochements sénestres N-S.

**MOTS-CLES.** Bolivie, Paragenèse, Tectonique, Sphalérite, Galène.

**ABSTRACT.** Paragenetic and structural analysis of San Matias and Capillani ore deposits (Toropalca - Potosi, Bolivia). Paragenetic and structural analysis of ore deposits, of Tertiary age, at San Matias and Capillani (Potosi, Bolivia) have been carried out with the aim of establishing the relationships between mineralizations (Pb-Zn-Ag) and tectonic deformations. In this southern part of the Eastern Andean Cordillera, the orogenic evolution has caused the progressive rotation of the stress axis responsible for faults and shear zones through which the hydrothermal fluids circulated at low T°. Two main phases of deformation and mineralization can be demonstrated : (1) a dextral shearing during which the sphalerite deposits and quartz-siderite gangue crystallised along NE-SW and NNE-SSW reopened faults, and (2) a sinistral shearing with galena deposits mineralised in prismatic voids opened along NNE-SSW fractures interrupted by N-S segments. Finally, a third phase of mineralization, mainly of silver, has been recognized together with post-mineralization structures like the N-S sinistral faults.

**KEY WORDS.** Bolivia, Paragenesis, Tectonic, Sphalerite, Galena.

### 1. LE CONTEXTE GEOLOGIQUE ET LES OBJECTIFS DE L'ETUDE

#### 1.1. LA CORDILLERE ORIENTALE DE LA CHAINE ANDINE

Les collines de San Matias et Capillani, dans la région de Toropalca, se situent dans la province Nor Chichas du Département de Potosi (Bolivie), à 130

km au sud de Potosi. Cette région fait partie de la Cordillère orientale, une des trois unités morpho-structurales des Hauts Plateaux andins situés, dans les Andes centrales, entre le Piedmont pacifique et la Zone subandine plus à l'Est (Sébrier *et al.*, 1988). Avec la Cordillère occidentale et l'Altiplano, la Cordillère orientale est un segment orogénique allongé NW-SE dans la région de La Paz, et N-S après virgation, dans la région de Potosi (Fig. 1).

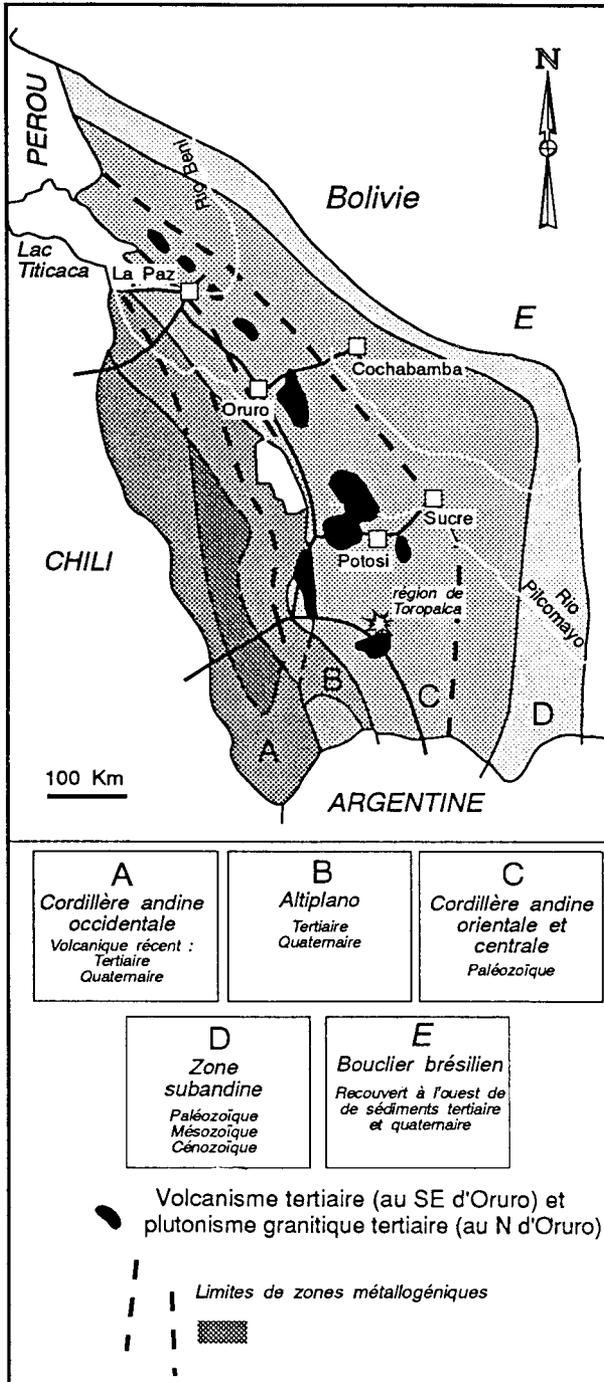


Fig. 1. Schéma des zones morpho-structurales et métallogéniques de la Cordillère andine en Bolivie (d'après Routhier, 1963).

Globalement, la Cordillère orientale est un vaste anticlinal N-S d'âge tardi-hercynien qui fut largement faillé, également N-S, lors de décrochements et cisaillements attachés à l'orogénèse andine. Outre le socle précambrien, les roches sont surtout des sédiments plissés et faiblement métamorphisés du Paléozoïque inférieur et des plutons granitoïdiques du Triasique tardif ou Néogène (Roeder, 1988; Audebaud *et al.*, 1973).

## 1.2. LA PROVINCE ETAIN-ARGENT BOLIVIENNE

Le terme général de province étain-argent de Bolivie comprend en fait deux sous-provinces : l'une étain-tungstène au Nord dans la Cordillère royale et l'autre au Sud, la province étain-argent de la Bolivie centrale et méridionale. Les filons minéralisés de cette province sont classiquement datés du Tertiaire, bien que dès 1971, Turneure signalait que non moins de six événements métallogéniques avaient été décrits de la fin du Paléozoïque à la fin du Tertiaire. Les minéralisations qui nous préoccupent dans le secteur de Potosi (Fig. 1), au Sud, sont quant à elles liées à la mise en place de stocks subvolcaniques subsuperficiels lors d'événements tectono-métallogéniques d'âge tertiaire, miocène et/ou pliocène (Turneure, 1971; Heuschmidt, 1979).

## 1.3. SAN MATIAS, CAPILLANI

Les minéralisations filoniennes reconnues dans la zone étudiée se disposent dans la partie sud d'une zone faillée N-S d'environ 8 km de long (l'axe Capillani - Toropalca). Du Nord au Sud, on trouve successivement le filon de San Matias, orienté N 20°E, les filons de Capillani (*Veta Principal*, *Veta Paralela*, et *Veta Cruzera*), orientés N 25°E à N 45°E, et le filon de Los Españoles, orienté ENE-WSW.

Le filon de Los Españoles est d'extension réduite, d'une dizaine de mètres de long pour 1 m d'épaisseur. Les minéralisations de Capillani et de San Matias sont plus importantes : il s'agit de grandes poches subverticales d'environ 200 m de long, d'une épaisseur variable pouvant atteindre 4 m et qui s'enfoncent jusqu'au moins 200 m avec un pendage de 55-60°S. Les minéralisations primaires sont formées de sulfures et sulfosels dans une gangue de quartz et sidérite, et constituent un minéral de haute teneur actuellement exploité par la *Sociedad Minera Toropalca Ltda* (environ 20% en Pb, 20% en Zn, et 300 g/t en Ag).

Les zones d'oxydation sont sporadiques et peu profondes (20-30 m). Elles ne se caractérisent que par la présence de quartz résiduel et de quelques minéraux d'altération (limonite, malachite, azurite, covellite et smithsonite).

L'encaissant, dont le contact avec les minéralisations est toujours franc, est formé d'épaisses séquences turbiditiques de schistes et grès ordoviciens plissés et faillés.

## 1.4. LES OBJECTIFS DE L'ETUDE

Les objectifs de ce travail sont de montrer comment deux études de ces filons minéralisés, l'une paragénetique et l'autre structurale, ont pu être mi-

ses en relation afin d'établir le contrôle structural de la mise en place des filons.

L'analyse métallogénique établira dans un premier temps la succession paragenétique des minéralisations en trois phases, successivement zincifère, plombifère et argentifère. Par ailleurs, des analyses du chimisme des minéralisations permettront d'établir les apports successifs en minerais et des analyses d'inclusions fluides, les températures (minima) d'homogénéisation des cristallisations dans les filons.

L'analyse structurale permettra de montrer que l'évolution progressive des filons et des phases de minéralisation s'est effectuée sous un important contrôle structural. Aux positions successives de l'axe principal de compression en rotation sénestre progressive, correspondront divers types de cisaillement et mécanismes tectoniques affectant spécifiquement les minéralisations de chaque phase, leurs textures ou les structures où elles prennent place.

## 2. ANALYSE METALLOGENIQUE

### 2.1. PARAGENÈSE DES GISEMENTS DE SAN MATIAS ET CAPILLANI

La paragenèse est l'association minérale qui résulte de processus géologiques donnés. Elle fut déterminée par analyse microscopique sur base d'échantillons provenant des sites de San Matias et Capillani. Trois catégories d'échantillons ont été étudiés, ils définissent l'encaissant, le filon et les veines.

#### 2.1.1. L'encaissant

L'encaissant est principalement constitué de schistes très altérés (oxyde de fer 45%, muscovite 30%, quartz 25%) et de quartzite (quartz 80%, muscovite 10% et oxyde de fer 10%).

#### 2.1.2. Le filon

L'ensemble de la gangue du filon a cristallisé de façon automorphe lors de la phase précédant le dépôt des sulfures. Avant et pendant la formation de ces sulfures, la cristallisation de la gangue s'est surtout faite en plages et en veines, alors qu'on la retrouve en ciment dans les fractures après la cristallisation de la sphalérite. La gangue est constituée de quartz (60%) et de sidérite (40%) avec quelques traces de biotite. Le quartz se trouve principalement associé aux carbonates dans le remplissage de veines millimétriques ou recoupant les plages de carbonates par des fissures de quelques microns.

La phase minéralisée est constituée de 7 minéraux qui sont principalement la sphalérite et la galène, et dans une moindre mesure la tétraédrite, la bournonite, la pyrite, la chalcopryrite et enfin très peu de famatinité.

La **sphalérite** se présente principalement en grandes plages irrégulières et rarement en cristaux individuels. La sphalérite du gisement est découpée par de nombreuses veines de gangue, galène, tétraédrite et bournonite (Pl. 1A). Elle comprend de nombreuses textures dites d'exolutions de chalcopryrite mais reconnues depuis peu, par Bente & Doering (1993), comme étant le fait de ségrégations par diffusion induite (diffusion-induced segregations ou DIS). La sphalérite d'origine devait être riche en fer, la libération de cet élément à pu servir à former la chalcopryrite. Ces textures de chalcopryrite sont parfois nettement moins nombreuses de part et d'autre des veines de tétraédrite (Pl. 1B). L'une des explications à ce fait est l'existence de certains déplacements post-cristallisation, en l'occurrence une diffusion du cuivre de la chalcopryrite vers la tétraédrite.

La **galène** est l'un des minéraux majoritaires du gisement. Trois types d'inclusions apparaissent dans les grandes plages de galène, il s'agit principalement de la bournonite (Pl. 1C) et de la tétraédrite, avec dans une moindre mesure de la famatinité. Le caractère tardif de la galène par rapport à la sphalérite et la pyrite est dominant dans l'ensemble du gisement sauf dans quelques échantillons où la cristallisation des deux minerais semble contemporaine. La galène se retrouve également sous forme de ciment au sein de la gangue.

La **chalcopryrite** est présente principalement sous la forme de remplacements par diffusion (DIS de Bente & Doering, 1993) au sein de la sphalérite. Outre ces textures, des grains de chalcopryrite de plus grande dimension (de 0.5 à 3 mm) ont cristallisé. Ils sont souvent fracturés et cimentés par de la tétraédrite et de la galène. Une phase de pyritisation a également affecté ces grains (Pl. 1D).

La **pyrite** montre une nette tendance au développement de cristaux idiomorphes surtout clairsemés dans la gangue, dans l'encaissant et plus rarement dans la galène. Ils sont parfois rassemblés de façon sphérique formant alors les pyritosphères. De la pyrite en plage est également observable en de rares endroits.

Suite à diverses observations de son remplacement par le quartz, la sphalérite, la galène, la bournonite et la tétraédrite, on peut conclure que cette pyrite est de genèse plus précoce que la py-

rite idiomorphe (Pl. 2A). Le troisième type d'occurrence des pyrites se présente sous la forme d'un fin liseré à l'interface des grains.

La **bournonite** apparaît en gouttes (< 1 mm) disséminées dans la galène ou en petites plages au côté de la **tétraédrite** (Pl. 1C). La **tétraédrite** est ainsi le plus souvent associée à la bournonite qu'elle remplace (Pl. 1C). On la trouve également au sein de la pyrite, de la sphalérite et de la galène où elle cimente les veines (Pl. 1A). Enfin, la **famatinite** est apparue comme un minéral relativement rare au sein du gisement. Elle se dispose en microplage au sein de la bournonite.

### 2.1.3. Les veines

Les veines sont composées de quartz et de sidérite avec parfois de la biotite et souvent des oxydes de fer d'altération. Elles se situent à la fois dans l'encaissant et dans le filon. Cependant, le remplissage des veines ainsi que leur disposition au sein du gisement montrent clairement qu'elles sont contemporaines de la formation du minerai zincifère.

## 2.2. SUCCESSION PARAGÉNÉTIQUE

La succession paragenétique, ou l'ordre de cristallisation des minéraux de la paragenèse, fut reconstituée par l'étude des relations morphologiques (textures) entre les minéraux (Fig. 2).

Métaux majeurs	Minéraux	Pourcentage approximatif du volume filonien	Mise en place progressive des minéralisations
Fe	pyrite (cubes, plages)	2%	—
	sidérite (rhomboédres, plages)	8%	
Zn	sphalérite (plages)	25%	—
Cu	chalcopryrite (exsolutions)	2%	—
Pb	galène	2%	—
	quartz (idiomorphes, plages)	12%	
Pb	galène	30%	—
Cu Pb Sb	bournonite	1%	—
Fe	pyrite (cubes, plages)	1%	—
Cu	chalcopryrite (plages)	1%	—
Zn	sphalérite (gouttes)	5%	—
	quartz (veines)	4%	
	sidérite (veines)	4%	
Cu Pb Sb	bournonite	2%	—
Ag	tétraédrite	1%	—
Fe	pyrite (pyritosphères, liserés)	/	—
Cu Sb	famatinite	/	—

Fig. 2. Les paragenèses minérales des filons de San Matias et Capillani.

Lors d'une **première phase**, quartz, sidérite, pyrite et sphalérite cristallisent. Cependant, au sein de cette phase, la sphalérite et la pyrite ont cristallisé avant les minéraux de gangue. Les minéralisations de galène et chalcopryrite sont quant à elles apparues en fin de cette première phase.

Lors d'une **deuxième phase**, la cristallisation a impliqué principalement la galène, la pyrite et la chalcopryrite, alors que des minéraux précédant, seuls la sidérite et la sphalérite continuent à se former. De nouvelles fissures sont cimentées par une phase de quartz et de carbonate et la bournonite commence à cristalliser.

Enfin, la **troisième phase**, mineure, fut le siège de la cristallisation de trois minéraux principaux : la bournonite, la tétraédrite et la famatinite. Durant cette phase, la pyrite a quant à elle continué à cristalliser.

## 2.3. ANALYSE CHIMIQUE

### 2.3.1. Le dosage à la microsonde

Sept échantillons provenant des sites de San Matias et Capillani furent analysés à la microsonde (CAMST - Louvain-la-Neuve, Cameca Camebax) pour lesquels nous avons dosé dix éléments intervenant dans le système cristallin des minéraux étudiés (Warny, 1992). Il s'agit du soufre, du plomb, du zinc, du fer, du manganèse, du cadmium, du cuivre, de l'argent, de l'arsenic et de l'antimoine.

Les formules stoechiométriques pour l'ensemble des minéraux analysés représentent les termes extrêmes obtenus (Fig. 3). Ils résument parfaitement les substitutions et les contaminations qui ont affectés les minerais.

La comparaison des analyses à la microsonde et de la succession paragenétique a permis de déterminer au sein de quelle phase sont apparus les différents éléments.

### 2.3.2. Les apports en minerais

Lors de la phase 1, les apports principaux concernent le zinc, le fer et le cadmium (trace), suite à la cristallisation de la sphalérite et de la pyrite. Les teneurs en zinc sont suffisamment importantes pour en permettre l'exploitation.

La phase 2 est riche en minerais utiles, en effet du plomb (galène), du zinc (sphalérite et galène), du cuivre (chalcopryrite) et du fer (chalcopryrite et pyrite) sont apportés par les diverses phases minérales. Le plomb est présent en grande quantité vu la présence générale de galène.

<b>Galène</b>
<i>San Matias</i> PbS à (Pb <sub>0.996</sub> , Zn <sub>0.001</sub> )S
<i>Capillani</i> PbS à (Pb <sub>0.981</sub> , Zn <sub>0.008</sub> )S
<b>Sphalérite</b>
<i>San Matias</i> (Zn <sub>0.992</sub> , Fe <sub>0.019</sub> , Cu <sub>0.002</sub> , Cd <sub>0.002</sub> )S à (Zn <sub>0.968</sub> , Fe <sub>0.020</sub> , Cu <sub>0.000</sub> , Cd <sub>0.001</sub> )S
<i>Capillani</i> (Zn <sub>0.931</sub> , Fe <sub>0.055</sub> , Cu <sub>0.000</sub> , Cd <sub>0.001</sub> )S à (Zn <sub>0.992</sub> , Fe <sub>0.032</sub> , Cu <sub>0.002</sub> , Cd <sub>0.002</sub> )S
<b>Pyrite</b>
<i>Capillani</i> (Fe <sub>1.012</sub> , As <sub>0.000</sub> , Cd <sub>0.004</sub> )S <sub>2</sub> à (Fe <sub>0.995</sub> , As <sub>0.009</sub> , Cd <sub>0.005</sub> )S <sub>2</sub>
<b>Chalcopyrite</b>
<i>Capillani (plage)</i> Cu <sub>0.991</sub> Fe <sub>0.985</sub> Zn <sub>0.009</sub> S <sub>2</sub>
<i>Capillani (exsolution)</i> Cu <sub>0.984</sub> Fe <sub>0.967</sub> Zn <sub>0.007</sub> S <sub>2</sub>
<b>Bournonite</b>
<i>San Matias</i> Cu <sub>0.977</sub> Pb <sub>0.992</sub> (Sb <sub>1.051</sub> , As <sub>0.020</sub> )S <sub>3</sub> à Cu <sub>1.018</sub> Pb <sub>1.018</sub> (Sb <sub>1.038</sub> , As <sub>0.020</sub> )S <sub>3</sub>
<i>Capillani</i> Cu <sub>1.016</sub> Pb <sub>0.973</sub> (Sb <sub>0.992</sub> , As <sub>0.015</sub> )S <sub>3</sub> à Cu <sub>1.053</sub> Pb <sub>1.018</sub> (Sb <sub>1.013</sub> , As <sub>0.025</sub> )S <sub>3</sub>
<b>Tétraédrite</b>
<i>San Matias</i> (Cu <sub>8.02</sub> , Ag <sub>2.13</sub> , Zn <sub>1.68</sub> , Fe <sub>0.36</sub> ) <sub>12.19</sub> (Sb <sub>4.18</sub> , As <sub>0.11</sub> )S <sub>13</sub>
<i>Capillani</i> (Cu <sub>8.07</sub> , Ag <sub>2.18</sub> , Zn <sub>1.46</sub> , Fe <sub>0.72</sub> ) <sub>12.43</sub> (Sb <sub>3.97</sub> , As <sub>0.14</sub> )S <sub>13</sub>
<b>Famatinite</b>
<i>Capillani</i> (Cu <sub>2.928</sub> , Zn <sub>0.009</sub> ) (Sb <sub>1.019</sub> , As <sub>0.022</sub> )S <sub>4</sub>

Fig. 3. Tableau des formules stoechiométriques extrêmes obtenues à la microsonde sur les diverses phases minérales des échantillons de San Matias et Capillani.

Lors de la phase 3, le trait principal est l'apparition de la bournonite, de la tétraédrite et de la famatinite. Les apports de cette phase concernent ainsi le plomb (bournonite), l'arsenic (bournonite et tétraédrite), l'antimoine (bournonite, tétraédrite et famatinite), le cuivre (bournonite, tétraédrite et famatinite) et enfin l'argent (tétraédrite) qui renforce par sa présence la richesse du gisement.

## 2.4. L'ÉTUDE DES INCLUSIONS FLUIDES

Les inclusions furent étudiées dans la sidérite et la sphalérite à l'aide de la platine Linkam TH 600. Deux générations d'inclusions sont présentes si l'on suit une classification chronologique basée sur l'époque de fermeture de la cavité par rapport à la cristallisation du minéral hôte (Shepherd *et al.*, 1985). Celles-ci sont appelées communément inclusions primaires et secondaires.

L'analyse des températures d'homogénéisation a par ailleurs fourni une estimation de la température minimale de formation de l'inclusion (Roedder, 1984).

La figure 4 est une synthèse des résultats obtenus. on peut constater que les résultats pour les inclusions fluides primaires dans la sidérite et la sphalérite sont comparables. En effet, la cristallisation des deux minéraux s'est déroulée lors d'une même phase. Cependant, les températures d'homogénéisation pour la sidérite sont principalement étalées entre 160° et 180°C, alors que pour la sphalérite, ces températures se situent surtout entre 200° et 220°C. Ceci confirme l'antériorité de la sphalérite sur la sidérite.

Les températures d'homogénéisation obtenues dans les sidérites pour les inclusions secondaires sont clairement situées entre 120° et 140°C. Ces inclusions, qui apparaissent postérieurement le long de plans de fractures, caractérisent sans doute ici la contrainte de cisaillement sénestre qui a affecté la seconde phase du gisement.

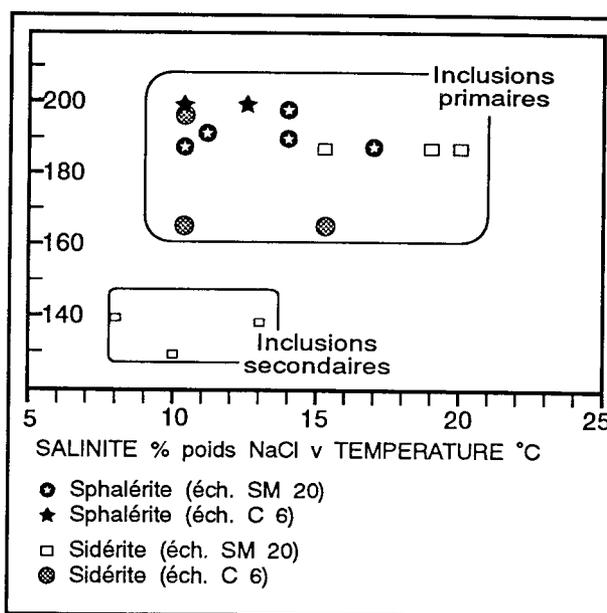


Fig. 4. Graphique des relations salinité/température des inclusions fluides étudiées à San Matias et Capillani.

La salinité des inclusions fluides fut estimée à l'aide de la température de fin de fusion de la glace et du clathrate. Le schéma indique clairement, par l'association des résultats de salinité (% NaCl) et de température (°C), une estimation de l'évolution de certains paramètres physico-chimiques lors de la mise en place du gisement. Il s'agirait d'une évolution correspondant à un simple refroidissement du système et/ou encore à un mélange avec un fluide plus froid ou moins salin.

### 3. ANALYSE STRUCTURALE

Les nouvelles données structurales acquises lors de nos levés ont permis de retracer l'évolution tectonique de la zone minéralisée et d'établir un parallélisme entre cette évolution et la paragenèse du minéral constitutif des filons (Jardon, 1993). Nous présenterons ici, sous une forme synthétique, les différentes étapes de l'évolution des filons.

#### 3.1. LE CONTEXTE STRUCTURAL AVANT LA FORMATION DES FILONS

Les minéralisations, d'âge supposé tertiaire, se sont mises en place dans des sédiments datés de l'Ordovicien supérieur, plissés lors de l'orogénèse hercynienne. Ces plis sont fermés, orientés N-S, et ennoyés d'une dizaine de degrés vers le Nord (Fig. 5). La schistosité en éventail montre un léger déversement vers l'est. Les plis sont sans conteste les structures les plus anciennes.

Ultérieurement, une zone de failles N-S légèrement NNE-SSW (notée F1, Fig. 5) s'est développée le long de l'axe Capillani - Toropalca. Des mouvements de types normaux y furent mis en évidence par l'angle d'environ 60° existant entre les deux familles de failles conjuguées qui forment la zone (Gidon, 1987). Celle-ci sépare deux blocs d'allure différente par les linéaments visibles sur photos aériennes : à l'Ouest, ce sont des linéaments bien marqués NNW-SSE ; et à l'Est, ils sont plus discrets et dirigés N-S. Plus tard, cette zone fracturée a servi de voie préférentielle d'acheminement des fluides minéralisateurs.

#### 3.2. EVOLUTION TECTONIQUE LORS DE LA MISE EN PLACE DES FILONS

Contrairement aux phénomènes de télescopage entre plusieurs phases minéralisées successives connus dans le Nord de la Bolivie, nous montrerons que pour les gisements de San Matias et Capillani, il y eut une évolution continue des phénomènes minéralisateurs. Nous pourrions démontrer que cette évolution fut le fait de la rotation progressive de la contrainte compressive maximale  $s_1$  qui a pivoté depuis une orientation E-W à une orientation N-S.

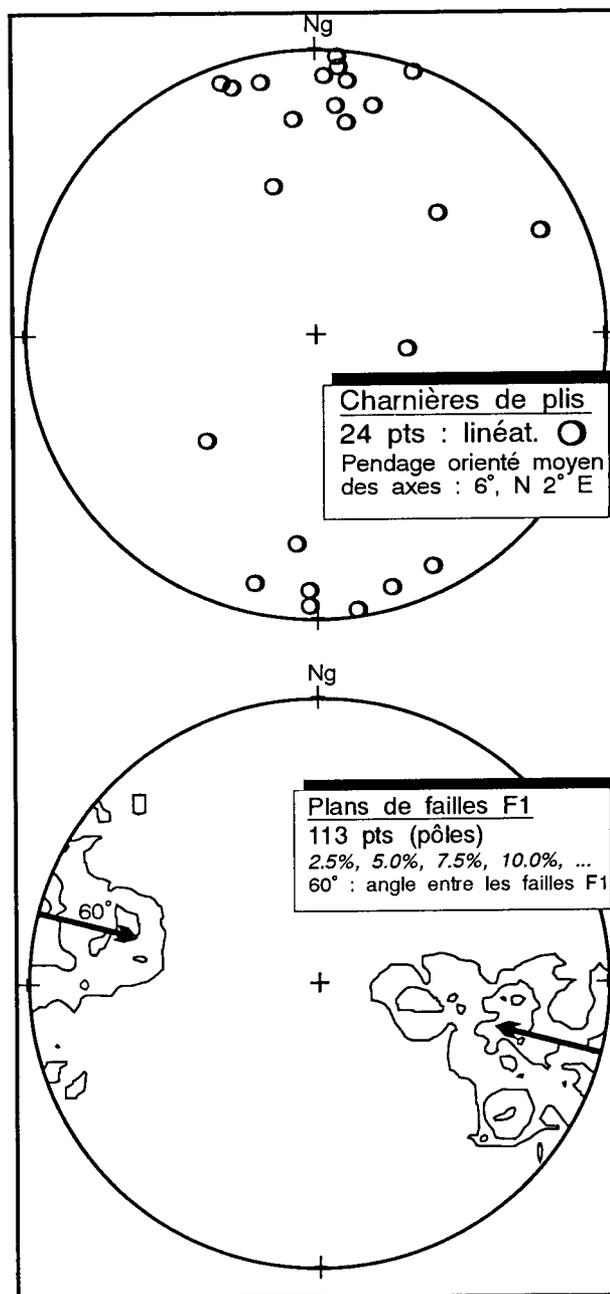


Fig. 5. Projections stéréographiques (canevas de Schmidt demi-sphère inférieure) des charnières de plis hercyniens et des failles F1 de San Matias et Capillani.

#### 3.2.1. Structures annonciatrices des minéralisations

Le début de l'épisode minéralisateur se caractérise par la formation de failles inverses (failles F21) dans l'axe Capillani - Toropalca. Ce second failage, N-S à NNE-SSW également, a emprunté les discontinuités formées par les failles F1. Les mouvements de type inverse ont été identifiés par les courbures d'entraînement affectant les schistes et par les stries de glissement sur les surfaces de failles.

En même temps que ce failage inverse, les roches enregistrent une augmentation de la pression

fluide avec la formation de brèches hydrauliques dans les schistes encaissants (Jébrak, 1992). Simultanément est apparu un premier réseau de veines subverticales E-W (notées **V21**) de type *crack and seal* (Ramsay & Huber, 1983) qui sont liées aux failles **F21**. Ces veines, millimétriques à décimétriques, sont semblables aux filons quant à leur minéralogie et de plus, leur taille et leur nombre sont de plus en plus élevés à l'approche de ceux-ci. L'ensemble de ces structures (failles **F21** et veines **V21**) témoignent d'une orientation E-W de  $s_1$ .

### 3.2.2. L'ouverture et le remplissage des filons

Tout d'abord s'est formé le filon de Los Españoles, orienté ENE-WSW, dont la minéralogie est composée principalement de sphalérite, quartz et sidérite (Fig. 6 agrandissement **a**). Les veines **V21** ont pris une orientation ENE-WSW et les failles **F21** continuèrent à se propager dans les failles **F1**.

#### a) La phase 1 zincifère en cisaillements dextres :

La contrainte  $s_1$  continua à pivoter de manière sénestre et s'est ainsi orientée NE-SW. Les segments de failles orientés N-S vont alors subir des cisaillements dextres (faillage **F22**) en transpression - un raccourcissement oblique accompagnant le cisaillement. De mêmes cisaillements auront lieu dans d'autres segments annexes du faillage **F1**, orientés NE-SW à NNE-SSW, qui vont alors s'ouvrir suivant une zone dite de transtension - une extension, cette fois, accompagnant le cisaillement. C'est dans ces segments en extension que se mirent en place les filons de San Matias et Capillani.

Les minéraux qui cristallisèrent sont principalement la sphalérite, le quartz et la sidérite. Les textures de remplissage correspondant au filon *Veta Cruzera* sont généralement de type massives (Fig. 6 agrandissement **b**), ou éventuellement rubanées (Jébrak, 1992), indiquant un parallélisme NE-SW entre ce filon et  $s_1$ . Pour les autres filons, orientés NNE-SSW, les textures sont de type laminées (Fig. 6 agrandissement **c**), avec alternance de bandes de minéraux différents, séparées les unes des autres par des surfaces de cisaillement (Jébrak, 1992; Pl. 2B). Dans certaines bandes de sphalérite particulièrement épaisses, on peut même observer de petite veinules transverses de quartz et sidérite, orientées ENE-WSW, qui forment un système en échelon restreint aux filons (Hancock, 1972).

La contrainte  $s_1$  s'orientait ensuite NNE-SSW, tandis que la sphalérite et la gangue firent progressivement place à la galène, de nouveaux rubans se formant dans ceux déjà en place (Fig. 6 agrandissement **d**). Les failles **F22** continuèrent à se développer en bordure des filons et dans l'encaissant, où se mirent en place les dernières veines de quartz et sidérite (veines **V22**). Ces veines sont identiques, dans leur forme et composition, aux veines **V21**, mais elles les recoupent cependant selon des orientations NE-SW à NNE-SSW.

#### b) La phase 2 plombifère en cisaillements sénestres :

Les cisaillements de type sénestres sont apparus quand la rotation des axes de contraintes a donné  $s_1$  une orientation de plus en plus proche de l'axe N-S.

A ces contraintes correspond, au cœur même des filons déjà formés, l'ouverture de caissons prismatiques, à sections horizontales en forme de parallélogrammes, minéralisés en galène (Pl. 2C ; Fig. 6 agrandissement **e**). Ces ouvertures, pouvant pomper des liquides minéralisés plus profonds, traduisent des mouvements de décrochement avec formation de fractures de Riedel. Les segments courts, orientés N-S, représentent des failles secondaires ouvertes par contrecoup du jeu sénestre des segments longs, orientés NNE-SSW, connectés en baïonnette par la continuation de fines veines de galène (Pl. 2D). La figure ainsi formée porte le nom de « motif en domino », plus souvent identifié aux ouvertures en *pull-apart*, et constitue la dernière manifestation visible sur le terrain de l'épisode de minéralisation.

Les minéraux constitutifs des filons subirent aussi d'importants mouvements cisailants sénestres, principalement cassants. La galène représente ici une exception puisqu'elle a pris une texture de plus en plus mylonitique et recristallisée (Siemens, 1977). Les mouvements dans les bordures des filons (failles **F23**) devinrent aussi de type sénestre.

#### c) La phase 3 argentifère :

Les minéraux de la phase ultime et mineure de minéralisation correspondant surtout à la phase argentifère ne purent être identifiés qu'au microscope et non plus sur le terrain. On ne peut actuellement les rattacher à un événement tectonique.

## 3.3. LES STRUCTURES POST-MINÉRALISATIONS

La dernière manifestation de la rotation de l'axe de contrainte  $s_1$ , qui s'orientait alors NNW-SSE, correspond à la formation de failles subverticales N-S (failles **F3**). Elles ont au moins en partie emprunté des discontinuités préexistantes et ont eu pour effet de segmenter les filons de façon sénestre : ce faillage correspond ainsi à la structuration finale des filons.

Enfin, de courts linéaments E-W et NW-SE furent interprétés comme étant des failles normales, éventuellement accompagnés d'une légère composante oblique en décrochement (Tahon, 1992).

## 4. CONCLUSIONS

Dans cette étude, il a été montré que les filons minéralisés de San Matias et Capillani (Toropalca - Potosi) ont eu une évolution paragenétique en trois phases successivement zincifère, plombifère et argentifère. Les associations minérales auraient cristal-

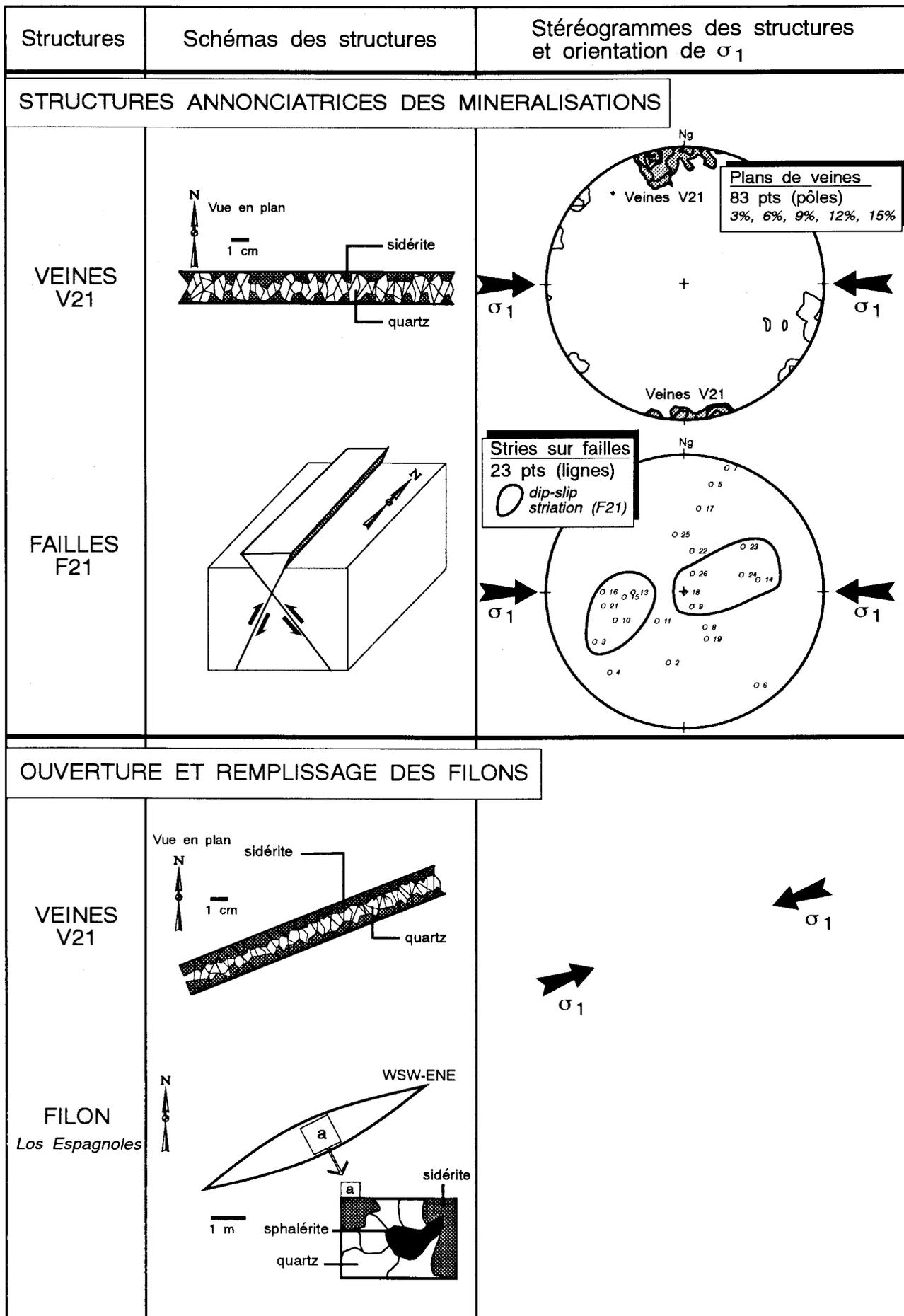


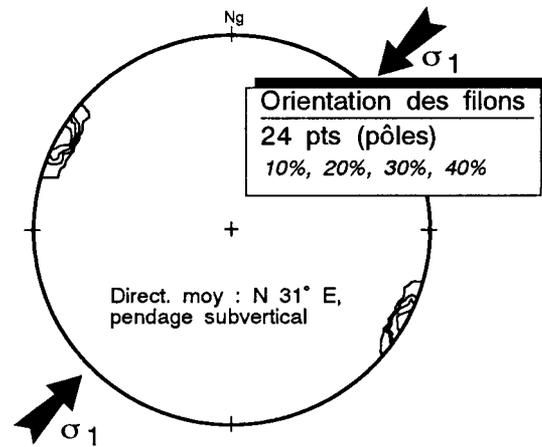
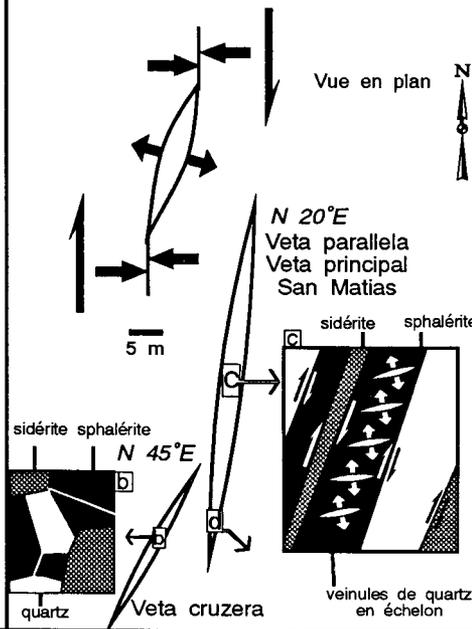
Fig. 6. Les éléments structuraux successifs liés aux phases minéralisées des filons de San Matias et Capillani: schémas des structures avec agrandissements (a-e) et projections stéréographiques (canevas de Schmidt, demi-sphère inférieure) avec les positions successives de  $\sigma_1$ .

**PHASE 1 ZINCIFERE : CISAILLEMENTS DEXTRES**

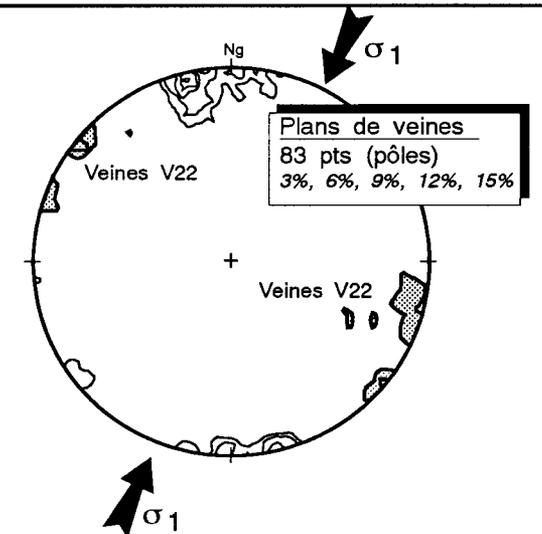
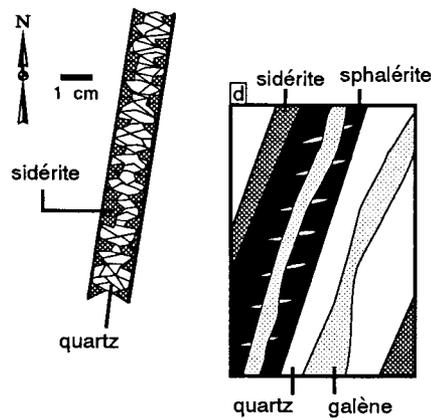
**FAILLES F22**  
transpression

**FILONS**  
transtension  
*San Matias*  
*Capillani*

**VETA CRUZERA**  
textures massives  
ou en encroûtements



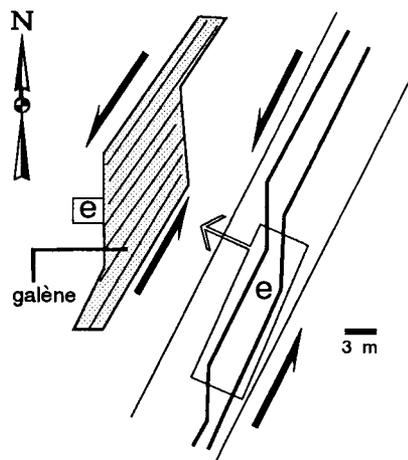
**VEINES V22**  
injection des premiers rubans de galène



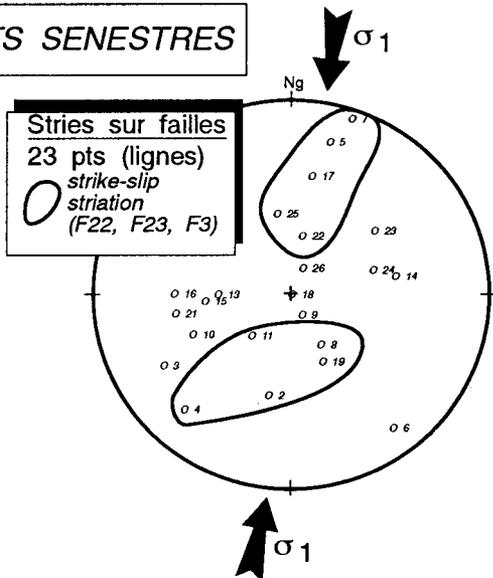
**PHASE 2 PLOMBIFERE : CISAILLEMENTS SENESTRES**

**FRACTURES DE RIEDEL**  
motifs en domino

**FAILLES F23**



**Stries sur failles**  
23 pts (lignes)  
strike-slip  
striation  
(F22, F23, F3)



lisé dans des conditions épithermales à mésothermales, à des températures de 200°-300°C pouvant correspondre ici à des profondeurs évaluées au kilomètre ou moins. Discutant de la source des minéralisations en Bolivie centrale et méridionale, Routhier présentait déjà en 1963 (p. 639) des conditions semblables en expliquant que l'association générale des filons de cette région avec des appareils volcaniques-subvolcaniques «*oblige à admettre que roches ignées (des plutons granitoïdiques liés à une ceinture volcanique d'âge tertiaire) et fluides minéralisants dérivent d'une source magmatique commune*».

Il semblerait, au vu des nouvelles données structurales présentées ici, que la mise en place des filons et minéralisations successives est très certainement contrôlée par les contraintes orogéniques andines, ici en régimes cassants et cisailants par transtension et transpression. Les structures tectoniques indiquent clairement que la contrainte principale, à l'origine des déformations de ce secteur, a subi une rotation progressive sénestre (E-W à N-S) pendant laquelle les minéralisations successives se sont mises en place. Des recherches bibliographiques sont en cours en vue de placer ces nouvelles informations sur le contrôle structural des minéralisations de la région de Toropalca dans le contexte régional et orogénique andin (Brodkom 1994).

## 5. REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, nous tenons à remercier tout spécialement la société BUGECO, initiatrice du projet, tant pour nous avoir proposé une partie des échantillons que pour sa précieuse aide technique et financière.

Pour l'un d'entre nous, qui fut envoyé en mission sur place, des remerciements particulièrement chaleureux vont à André et Isabelle Tahon pour leur accueil et leur assistance en Bolivie, à tout le personnel de la *Sociedad Minera Toropalca Ltda* et à Julio Cesar Peñeranda Serrano pour son accueil à La Paz. Nos remerciements s'adressent enfin, pour la qualité de ses commentaires, au Prof. D. Laduron de l'U.C.L.

## 6. BIBLIOGRAPHIE

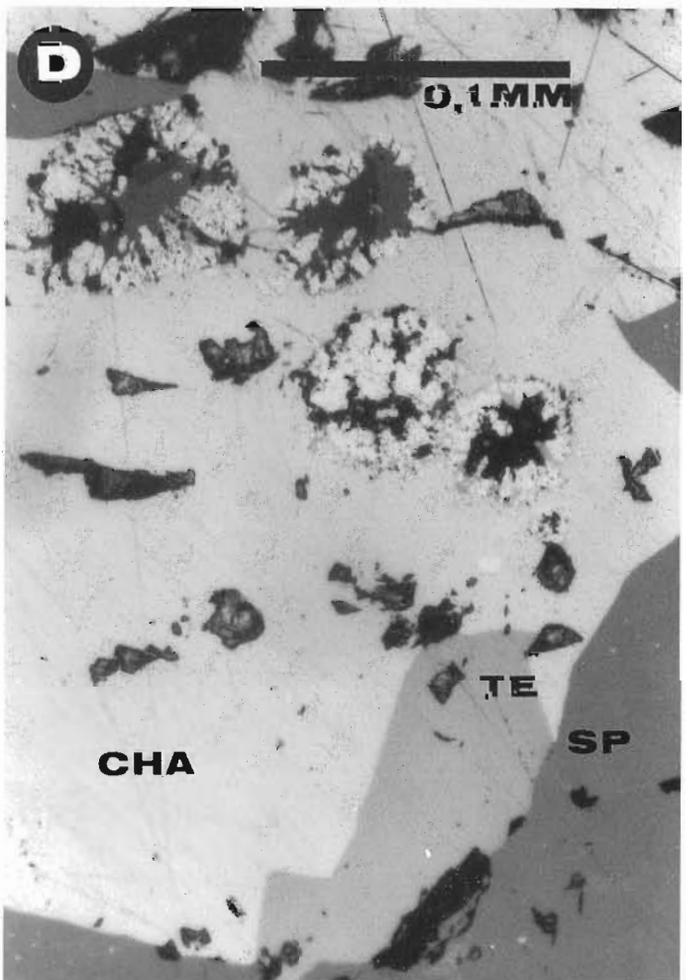
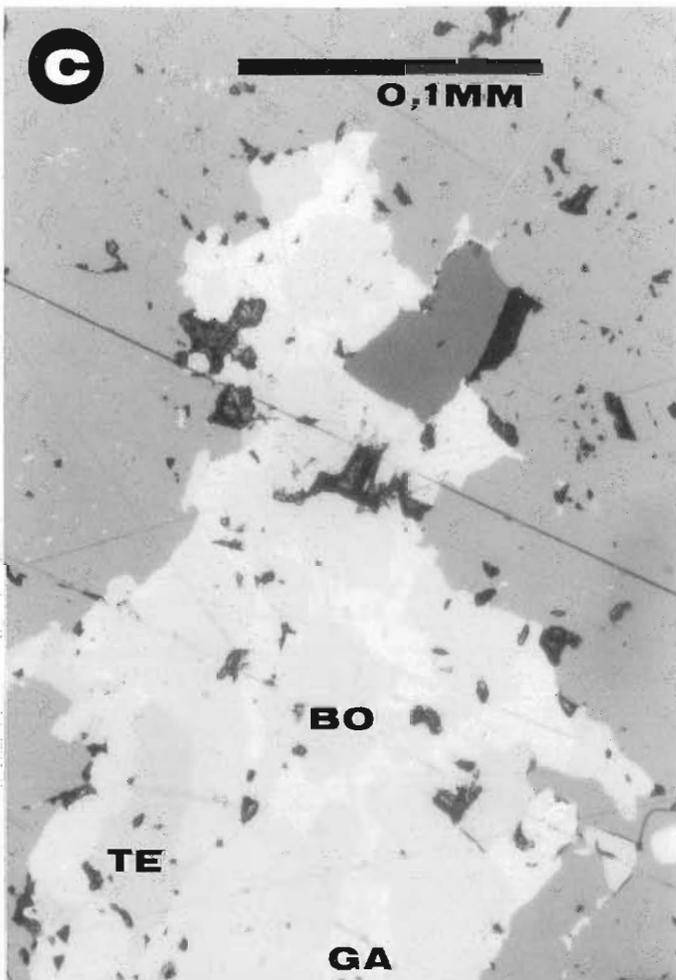
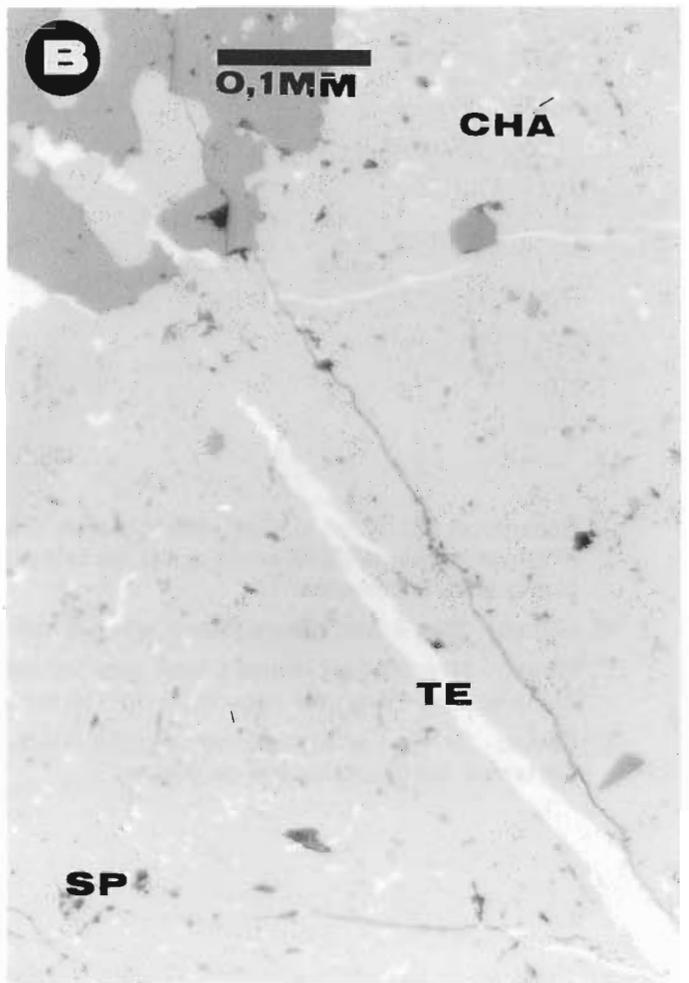
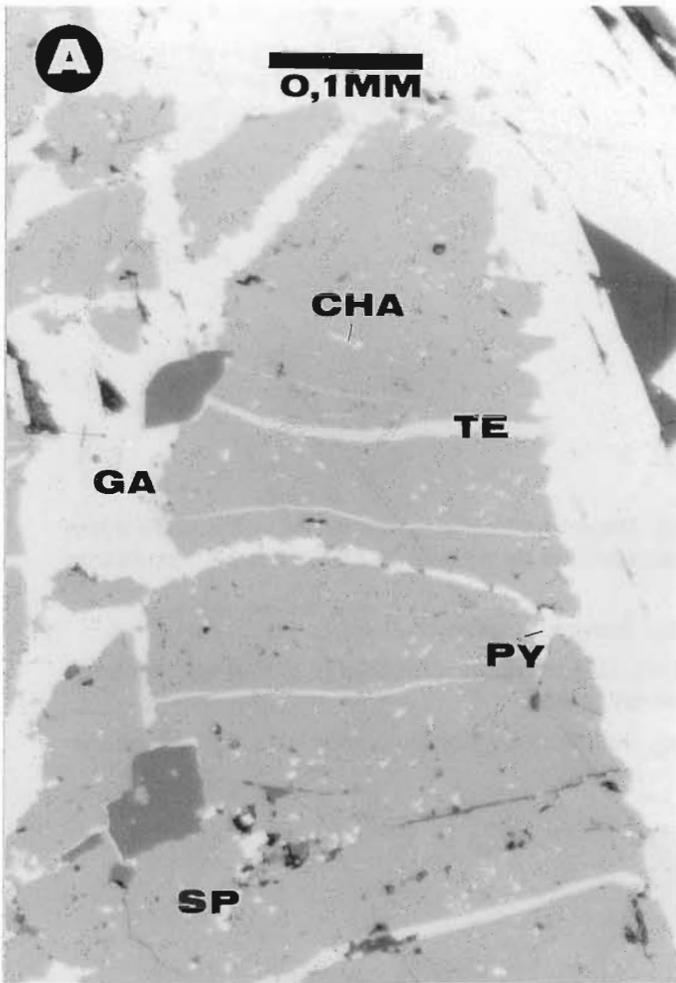
- AUDEBAUD, E., CAPDEVILA, R., DALMAYRAC, B., DEBELMAS, J., LAUBACHER, G., LEFEVRE, C., MAROCCO, R., MARTINEZ, C., MATTAUER, M., MEGARD, F., PAREDES, J. & TOMASI, P., 1973. Les traits géologiques essentiels des Andes centrales (Pérou-Bolivie). *Rev. géogr. phys et de géol. dyn.*, **15**: 73-114.
- BENTE, K. & DOERING, T., 1993. Solid-state diffusion in sphalerites : an experimental verification of the «chalcopyrite disease». *Eur. J. Mineral.*, **5**: 465-478.
- BRODKOM, F., 1994. Les permutations de paléocontraintes andines sont un des facteurs qui ont contrôlé l'évolution des paragenèses minérales de filons dans la province Sn-Ag bolivienne. 44 p. Thèse annexe de doctorat inédite, U.C.L.
- GIDON, M., 1987. Les structures tectoniques. 206 p. B.R.G.M., Manuels et Méthodes n°15, Orléans.
- HANCOCK, P.L., 1972. The analysis of en-échelon veins. *Geol. Mag.*, **109**: 269-276.
- HEUSCHMIDT, B., 1979. Gîtes minéraux et métallogénie de la Bolivie. *Chron. rech. min.*, **448**: 9-44.
- JARDON, B., 1993. Contribution à l'analyse métallogénique et structurale des gisements de San Matias et Capillani, Potosi, Bolivie. 86 p. Mémoire de Licence inédit, U.C.L.
- JEBRAK, M., 1992. Les textures intra-filoniennes, marqueurs des conditions hydrauliques et tectoniques. *Chron. rech. min.*, **506**: 25-35.
- RAMSAY, J.G. & HUBER, M.I., 1983. The techniques of modern structural geology ; Volume 1 : Strain analysis. 307 p. Academic Press, London.
- ROEDDER, E., 1984. Fluid inclusions. 644 p. Reviews in Mineralogy, **12**.
- ROEDER, D., 1988. Andean-age structure of Eastern Cordillera (Province of La Paz, Bolivia). *Tectonics*, **7**: 23-39.
- ROUTHIER, P., 1963. Les gisements métallifères : géologie et principes de recherches (Tome I). 867 p. Masson & Cie, Paris.
- SEBRIER, M., LAVENU, A., FORNARI, M. & SOULAS, J.-P., 1988. Tectonics and uplift in Central Andes (Peru, Bolivia and Northern Chile) from Eocene to present. *Géodynamique*, **3**: 85-106.
- SHEPHERD, T.J., RANKIN, A.H. & ALDERTON, D.H., 1985. A practical guide to fluid inclusions studies. 239 p. Blackie, London.
- SIEMENS, H., 1977. Recovery and recrystallisation of deformed galena. *Tectonophysics*, **39**: 171-174.
- TAHON, A., 1992. Forages d'exploration pour le développement des mines de San Matias et Capillani ; Toropalca, Bolivie. Rapport BUGECO inédit, Projet San Matias BU 179/207.
- TURNEAURE, F.S., 1971. The Bolivian Tin-Silver Province. *Bull. Soc. Economic Geologists*, **66**: 215-225.
- WARNY, S., 1992. Analyse minéralogique et paragenétique des gisements de San Matias et Capillani. 87 p. Mémoire de Licence inédit, U.C.L.

Manuscrit reçu le 31/01/94; accepté le 18/04/94.

\*\*\*\*\*

## PLANCHE 1

- A: Echantillon SM 17 en lumière réfléchie (éch. 0.1 mm). Plage de sphalérite (**SP**) remplacée par une veine de galène (**GA**) et tétraédrite (**TE**). notez la pyrite (**PY**) qui cristallise dans les veines de galène et les inclusions de chalcopyrite (**CHA**).
- B: Echantillon SM 17 en lumière réfléchie (éch. 0.1 mm). Zonation des DIS de chalcopyrite (**CHA**) de part et d'autre d'une veine de tétraédrite (**TE**) au sein de la sphalérite (**SP**).
- C: Echantillon SM 17 en lumière réfléchie (éch. 0.1 mm). Pyritisation "en grains" de la chalcopyrite (**CHA**) associée à la tétraédrite (**TE**) et la sphalérite (**SP**).
- D: Echantillon SM 17 en lumière réfléchie (éch. 0.1 mm). Pyritisation de la chalcopyrite en "grains". (**CHA**) = Chalcopyrite.



## PLANCHE 2

- A: Echantillon SM 17 en lumière réfléchie (éch. 0.5 mm). Remplacement/cimentation de cristaux de pyrite (**PY**) par la galène (**GA**), notez aussi les amas de cristallisation de tétraédrite (**TE**) dans les fissures de plus grande importance.
- B: Niveau - 28 m à San Matias (Nord), vue NE (éch. 1 m). Texture rubanée du filon.
- C: Niveau - 28 m de San Matias (Nord), vue SW (éch. 1 m). Une veine de sphalérite (à droite) est recoupée (dans le carré blanc) par l'ouverture du filon minéralisé en galène.
- D: Niveau - 33 m à San Matias, vue en plafond (éch. 1 m). Ouverture du filon en prisme à section de parallélogramme avec remplissage de galène.

