

Université du Québec

INRS-ETE

**Le système de veines épithermales et de failles normales au sein de la propriété Velardeña, Mexique : analyse structurale et métallogénique.**

Par

Eric Hoffmann

Mémoire

présenté

pour l'obtention

du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)

10 Mai, 2003

**"Imagination is more important than knowledge"**

**- Albert Einstein**

## Résumé

La mine Velardeña se situe dans la Sierra de San Lorenzo et comprend une série de veines épithermales à Ag-Au étroites, partiellement oxydées, ayant des directions qui varient entre est-ouest et NW - SE, ainsi que des gisements polymétalliques dans les skarns et les carbonates. Certaines des veines épithermales sont continues sur des distances allant jusqu'à 3 Km. Les relations de terrain indiquent qu'une activité hydrothermale minéralisatrice intense fut initiée lors de la première phase de tectonisme. Les veines minéralisées sont recoupées par deux failles normales majeures, les failles Buenaventura et Ordenanza (formées après l'épisode minéralisateur principal), ainsi qu'une série de failles subsidiaires caractérisées par une intense bréchification hydrothermale. Les failles Buenaventura et Ordenanza sont orientées nord-sud et décalent le niveau structural par plusieurs centaines de mètres.

Cette étude vise à étudier les relations structurales et génétiques entre les différents types de structures minéralisées et les différents types de failles tardives sur le site de la mine Velardeña. Pour ce faire, nous avons procédé à une cartographie de surface détaillée, la construction d'une banque de données structurales ainsi qu'une description macroscopique et l'échantillonnage des structures minéralisées et tardives. Nous avons également procédé à une étude microscopique et une analyse en métaux des veines du mur et du toit de la faille Buenaventura.

Le rejet calculé sur la faille Buenaventura est d'environ 340 mètres. Considérant ceci, de même que les similarités physiques et minéralogiques, il est possible de proposer les corrélations suivantes: Buenaventura 1 et Terneras; Buenaventura 3 et Roca Negra; Buenaventura 2, Viborillas et San Juanes et; Ordenanza 2, Pajaro Azul et San Mateo. L'importante quantité de fluides hydrothermaux ayant circulé dans les failles majeures est considérée comme péné-contemporaine de l'hydrothermalisme et le tectonisme des veines minéralisées et des failles tardives le tout résultant d'un événement tectonique unique et incrémental, contemporain d'une intense activité hydrothermale. L'hydrothermalisme minéralisateur qui suit la déformation Laramienne régionale est contemporain d'un régime en extension et de magmatisme associé dans le nord du Mexique.



Eric Hoffmann, B.Sc.



Alain Tremblay, Ph.D.



## Avant-propos

Ce mémoire est issu d'un projet de collaboration entre l'INRS-ETE et la société minière ÉcuSilver Inc. Je tiens à remercier la direction et le personnel de cette compagnie pour le support matériel et logistique qu'ils m'ont fourni lors de mon séjour au Mexique, à l'été de 1999.

Je tiens également à remercier les personnes suivantes :

- Mon directeur de mémoire Alain Tremblay, pour m'avoir poussé à réussir et pour m'avoir trouvé un aussi beau projet.
- Nicolas Pinet, pour son expertise sur la géologie du district et ses conseils judicieux.
- L'équipe du LCNP, pour leur support fiable en SIG
- Daniel Lebel, pour mon introduction à Microstation™.
- Benoît Dubé, pour son expertise en gisements épithermaux et l'opportunité qu'il m'a donnée.
- Louise Corriveau et Léopold Nadeau, pour leur expertise en pétrographie.
- Anita Brissette, pour son temps et son dévouement.
- Julie Chabbert et Philippe Alexander, pour la révision du texte.
- Nadine Doucet, pour la personne qu'elle est.



## Table des matières

<b>RÉSUMÉ .....</b>	<b>VII</b>
<b>AVANT-PROPOS.....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX .....</b>	<b>XIII</b>
<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
1.1. Géologie régionale.....	3
1.1.a. Centre du Mexique.....	3
1.1.b. District minier de Velardeña.....	8
1.1.c. Historique minier du district .....	11
1.2. Contexte géologique de la mine Velardeña.....	13
1.2.a. Historique de l'exploitation.....	13
1.2.b. Nature des roches encaissantes.....	14
1.2.c. Contexte lithologique et structural des zones exploitées .....	16
1.3. Problématique des travaux.....	17
1.4. Méthodologie et présentation des résultats.....	17
<b>2. LA PROPRIÉTÉ VELARDEÑA .....</b>	<b>20</b>
2.1. Roches-hôtes.....	20
2.1.a. Les roches mésozoïques.....	21
2.1.b. Les roches intrusives.....	21
2.1.c. Les roches tertiaires.....	23
2.2. Structures-hôtes .....	24
2.2.a. Zone de Santa Juana .....	24
2.2.b. Veine de Terneras.....	26
2.2.c. Veine de San Juanes .....	27
2.2.d. Veine de San Mateo.....	28
2.2.e. Autres veines .....	28
2.3. Interprétation courante.....	29
2.4. Failles tardives .....	30
<b>3. STRUCTURES ET MINÉRALISATIONS DU TOIT DE LA FAILLE BUENAVENTURA.....</b>	<b>31</b>

<b>3.1.</b>	<b>Roches-hôtes.....</b>	<b>31</b>
<b>3.2.</b>	<b>Structures-hôtes .....</b>	<b>31</b>
3.2.a.	Zone Buenaventura.....	32
3.2.b.	Zone Ordenanza .....	35
3.2.c.	Zone Viborillas .....	37
3.2.d.	Zone Pajaro Azul.....	38
3.2.e.	Zone minéralisée dans les volcanites .....	40
<b>3.3.</b>	<b>Minéralogie et Paragenèse.....</b>	<b>40</b>
<b>4.</b>	<b>STRUCTURES POST-MINÉRALISATION.....</b>	<b>46</b>
<b>4.1.</b>	<b>Les failles majeures.....</b>	<b>46</b>
4.1.a.	Faille Buenaventura .....	46
4.1.b.	Faille Ordenanza.....	48
<b>4.2.</b>	<b>Les failles subsidiaires.....</b>	<b>50</b>
<b>4.3.</b>	<b>Interprétation cinématique et géométrique.....</b>	<b>51</b>
4.3.a.	Arguments régionaux .....	51
4.3.b.	Arguments locaux .....	54
<b>5.</b>	<b>SYNTHÈSE STRUCTURALE ET INTERPRÉTATION GÉNÉTIQUE.....</b>	<b>59</b>
<b>5.1.</b>	<b>Scénario de corrélation de part et d'autre de la faille Buenaventura .....</b>	<b>59</b>
<b>5.2.</b>	<b>Hydrothermalisme des structures syn- vs post-minéralisation .....</b>	<b>64</b>
<b>5.3.</b>	<b>Modèle structural et génétique .....</b>	<b>70</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONS.....</b>	<b>73</b>
	<b>APPENDICE A .....</b>	<b>76</b>
	<b>APPENDICE B .....</b>	<b>87</b>
	<b>APPENDICE C .....</b>	<b>89</b>
	<b>LISTE DE RÉFÉRENCES .....</b>	<b>94</b>

Liste des figures et des tableaux

<u>Figure</u>	<u>Titre</u>	<u>Page</u>
1	Carte de Localisation de la région de Velardeña .....	1
2	Districts miniers du centre du Mexique .....	2
3	Les provinces physiographiques du Mexique .....	4
4	Colonnes stratigraphiques pour le nord du Mexique .....	5
5	Carte géologique du district minier de Velardeña .....	10
6	Géologie préexistante de la mine .....	11
7	Carte géologique .....	20
8	Coupe Composite A-A' et B-B' .....	21
9	Carte géologique de la partie SW de la Sierra de San Lorenzo .....	22
10	Représentation schématique du contact discordant calcaire - conglomérat .....	23
11	Orientation des veines du mur et du toit de la faille Buenaventura .....	32
12	Coupe schématique de la veine Buenaventura 1 .....	33
13	Coupe partielle de la séquence d'événements hydrothermaux à Velardeña .....	37
14	Coupe transversale de la veine Pajaro Pinto .....	39
15	Orientation des failles majeures et subsidiaires .....	47
16	Coupe schématique de la faille Ordenanza .....	49
17	Localisation de certains districts miniers dans la moitié nord du Mexique ...	52
18	Analyse tectonique des contraintes en utilisant la méthode Angelier .....	55
19	Projection des contraintes principales dans le demi-graben d'Aljibes .....	57
20	Reconstruction géométrique du scénario .....	61
21	Profil vertical idéalisé de la corrélation B2 - Viborillas - San Juanes .....	62
22	Coupe longitudinale des veines Terneras et B1 post- et pré-déformation ...	63
23	Localisation de gisements discutés dans ce mémoire .....	66
24	Histoire géologique de la région de Velardeña .....	71

<u>Tableau</u>	<u>Titre</u>	<u>Page</u>
1	Réserves et ressources de la mine Velardeña .....	13
2	Teneurs des veines de la propriété minière Velardeña .....	14
3	Âge de la minéralisation et du tectonisme associé pour certains gisements épithermaux dans divers districts du Mexique.....	53
4	Teneurs des veines de la propriété minière Velardeña et rapports de certains métaux .....	68



# 1. INTRODUCTION

Le district minier de Velardeña (figs. 1 et 2) est situé dans la partie est de l'état de Durango dans la république du Mexique, à 700 km au NW de la ville de Mexico. Il se trouve à environ 95 km au SSW de la ville de Torreón et à 270 km au NE de la ville de Durango. Le district comprend deux chaînes de montagnes; la Sierra de San Lorenzo, qui culmine à 2325 mètres, se trouve dans la partie NE du district. De l'autre côté de la vallée de Cuencame, au SW de la Sierra de San Lorenzo, se trouve la Sierra de Santa Maria, qui elle culmine à 1750 mètres.



Figure 1: Carte de Localisation de la région de Velardeña (d'après EcuSilver, 1999)

La région de Velardeña a été l'objet de peu d'articles scientifiques, malgré près de 4 siècles d'exploitation. Le premier rapport détaillé de la région vient de Spurr et Garrey (1908) "The Ore Deposits of the Velardeña District, Mexico". Il y a aussi un article

s'intitulant "On Three Contact Minerals from Velardeña, Durango, Mexico" de F. E. Wright (1908). Une description et un historique du district de Velardeña ont été donnés par Santillan (1936), comme faisant partie de sa "Carta-Geológico-Minera del Estado de Durango".

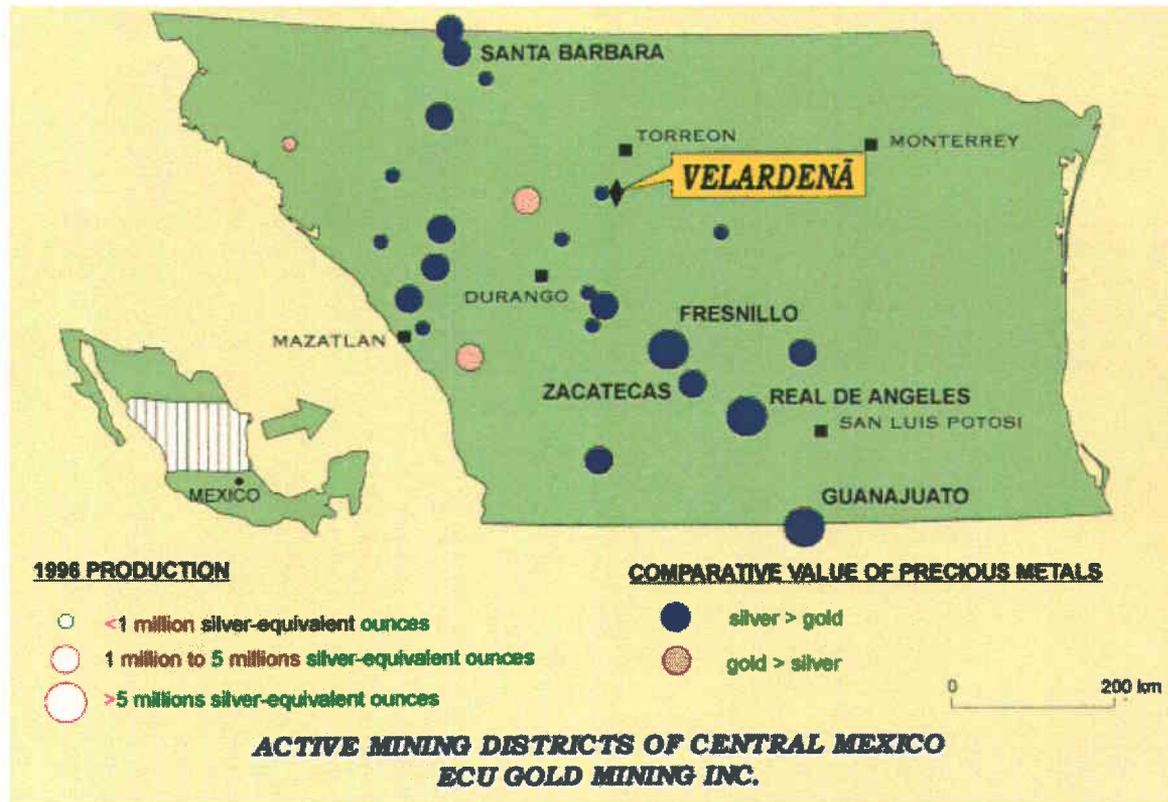


Figure 2: Districts miniers du centre du Mexique (d'après ÉcuSilver, 1999)

Plus récemment, il y a eu quelques études, dont une maîtrise par Levich (1973) de l'Université du Texas à Houston. Sa thèse est une étude descriptive de la structure et de la minéralogie du dôme de la Sierra de Santa Maria. Deux articles parus en 1979 (Ambriz, 1979; Felder, 1979) traitent respectivement de nouvelles masses minéralisées découvertes dans le dôme de Santa Maria et de leurs structures avoisinantes. Les articles de Gilmer et al. (1986), Gilmer et al. (1987) et Gilmer et al. (1988) traitent de la Sierra de Santa Maria et de ses dépôts métallifères. Il existe quelques monographies (Salas, 1975, Salas, 1991) sur la géologie économique du Mexique. Il y a aussi un numéro spécial de *Economic Geology* dédié aux gisements de métaux précieux mexicains qui est paru en 1988.

Le présent travail représente le résultat de 2 années de travaux de terrain, d'analyse et d'interprétation concernant la structure et la métallogénie d'une partie de la propriété Velardeña. Les résultats de ces travaux vont nous permettre de discuter de nouvelles cibles d'exploration dans une zone où les veines minéralisées ne furent exploitées que de façon artisanale.

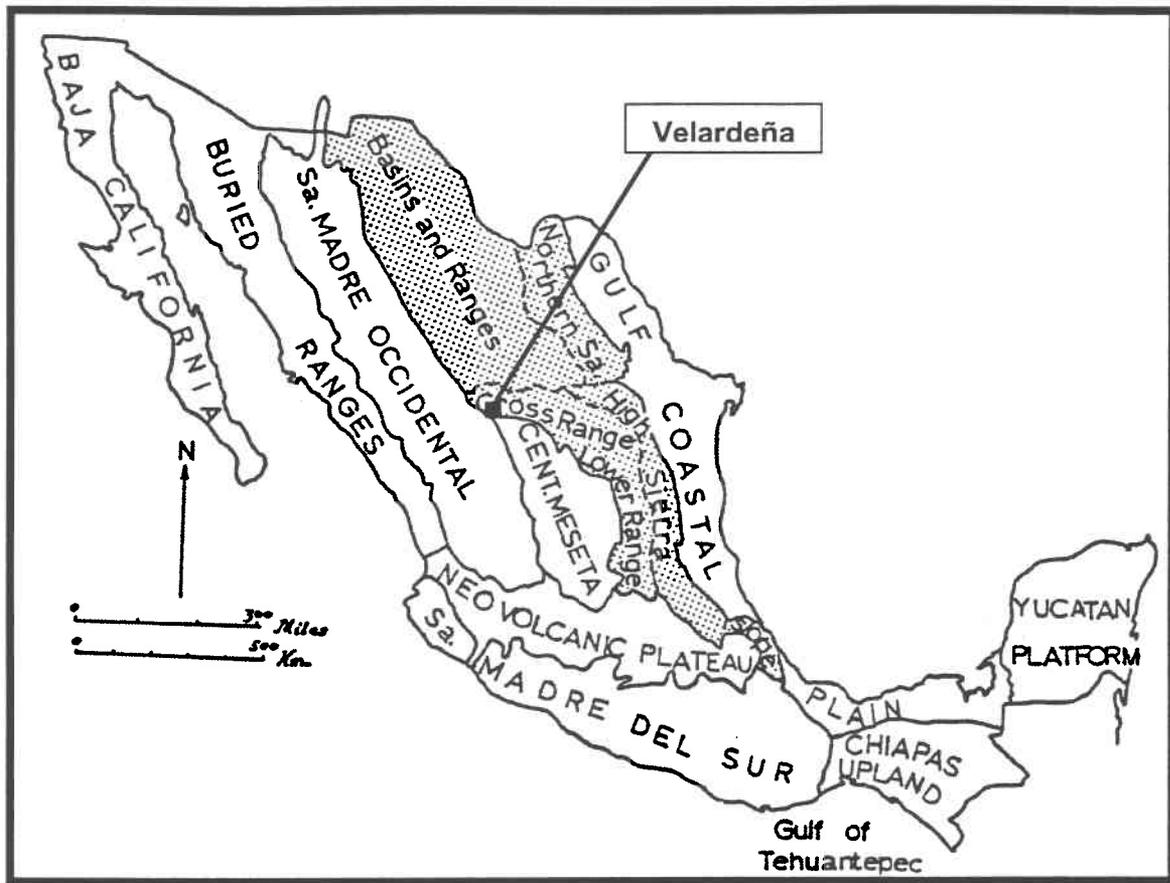
## **1.1. Géologie régionale**

### **1.1.a. Centre du Mexique**

La partie centrale du Mexique est caractérisée par des provinces physiographiques orientées NNW - SSE (fig. 3) ayant des dimensions de l'ordre de plusieurs centaines de kilomètres. Les deux provinces physiographiques auxquelles nous allons faire allusion dans ce mémoire sont la Sierra Madre Orientale, où se trouve le terrain d'étude (qui fait partie de la province du Basin and Range (fig. 3)) et la Sierra Madre Occidentale.

La Sierra Madre Occidentale correspond à de vastes plateaux culminant à plus de 3 000 mètres. Cette dernière est la plus grande province volcanique silicique au monde et provient d'un volcanisme Éocène – Miocène (McDowell et Keizer, 1977; Swanson et al., 1978; Aguirre-Díaz et McDowell, 1991). Les effets de l'orogénie laramienne sont peu visibles et la Sierra ne montre que peu les effets de l'extension que l'on voit si bien dans la province du Basin and Range (Henry & Aranda-Gomez., 2000).

La Sierra Madre Orientale (fig. 3) est, pour sa part, caractérisée par l'alternance de plaines alluviales et de chaînes de montagnes, dont la Sierra de San Lorenzo où se trouve la zone d'étude (topographie de type 'Basin and Range', fig. 5) et la Sierra de Santa Maria (dôme ignée à proximité de la zone d'étude, fig. 5). Elle a subi plusieurs épisodes d'extension débutant à l'Oligocène (Henry et Aranda-Gomez, 1992; Aguirre-Díaz et McDowell, 1993; Aranda-Gomez et al., 1997).

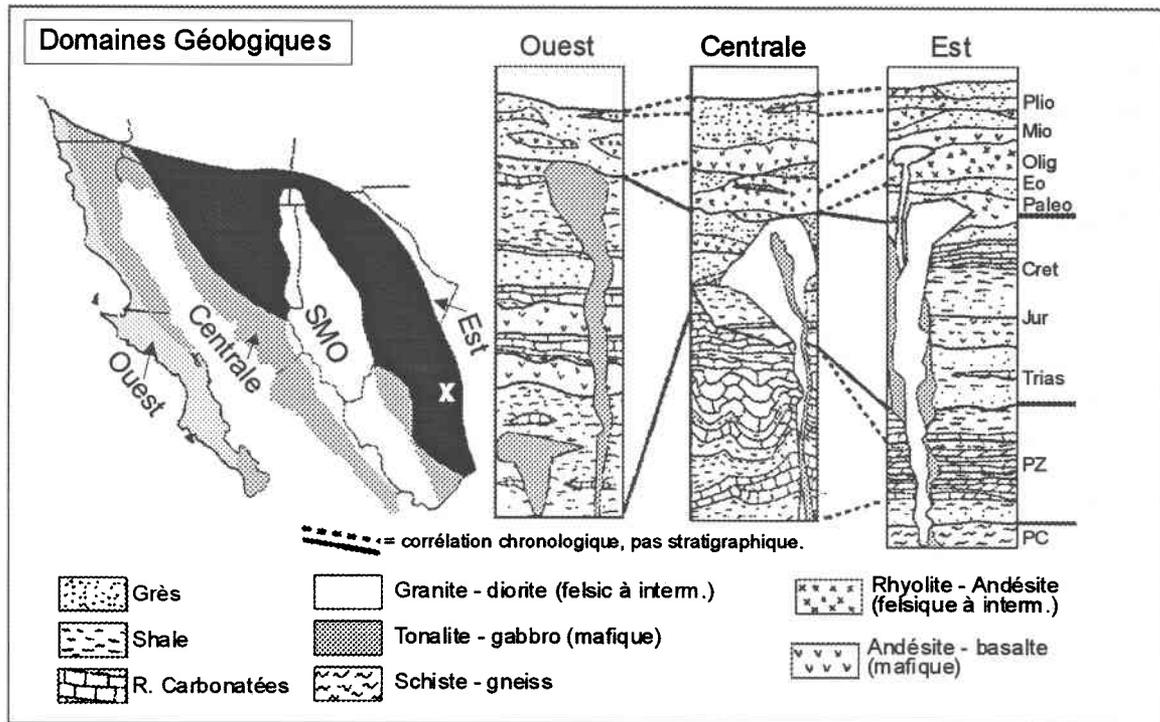


**Figure 3: Les provinces physiographiques du Mexique. La Sierra Madre Orientale est en pointillé. (D'après Levich, 1973)**

La Sierra Madre Orientale est orienté NNW (fig.4), de l'isthme de Tehuantepec, jusqu'aux environs de Monterrey, où les plis laramiens courbent brusquement vers l'ouest. La ceinture orogénique continue vers l'ouest au delà de Saltillo et Torréon, où les plis subissent une virgation vers le NNW, et s'orientent en direction d'El Paso (figs. 1 et 3) (Levich, 1973). Le socle pré-mésozoïque affleure très peu et son interprétation est encore débattue.

Dans la figure ci-dessous, Staude et Barton (2001) ont proposé des séquences stratigraphiques pour les parties Centrales, Est et Ouest du Mexique. Les roches les plus vieilles de la Sierra Madre Orientale sont des gneiss précambriens et des schistes de la partie centrale ouest de Tamaulipas (fig.1) et à l'est de Hidalgo (fig. 1; fig.4, colonne EST). Les roches paléozoïques inférieures, principalement des carbonates, affleurent dans cette partie de Tamaulipas, tandis que les roches paléozoïques

supérieures se retrouvent à Chihuahua (fig.1), au SW de Coahuila (fig.1), au NW de Zacatecas (fig.1) ainsi que dans la partie centrale ouest de Tamaulipas.



**Figure 4: Colonnes stratigraphiques pour les différents domaines géologiques du nord du Mexique. SMO = Sierra Madre Occidentale. Velardeña indiqué par un X (d'après Staude et Barton, 2001).**

Dans le NE du Mexique, les calcaires du Jurassique moyen - Crétacé reposent en discordance sur des roches clastiques du Jurassique supérieur - Jurassique moyen, qui reposent en discordance sur les roches paléozoïques et/ou précambriennes.

Les formations sédimentaires que l'on trouve dans le district minier de Velardeña comprennent les formations Aurora, Cuesta del Cura et Indidura. La Formation Aurora, avec une épaisseur de plus de 200m est d'âge Crétacé moyen et constitue la majeure partie des reliefs dans le nord du Mexique. La Formation Cuesta del Cura, avec une épaisseur allant jusqu'à 290m, représente les calcaires crétacés que l'on rencontre partout sur la propriété de la mine Velardeña. Finalement, la Formation Indidura possède une épaisseur allant jusqu'à 800 m.

L'épaisse séquence de calcaire de la Formation Aurora s'est déposée dans des mers du Crétacé inférieur. L'épaisseur de la séquence est une indication des conditions stables qui ont prévalu sur de longues périodes de temps. Des conditions relativement stables ont continué lors de la sédimentation de la Formation Cuesta del Cura du début Crétacé et de la Formation Indidura du Crétacé supérieur. Cependant, la présence d'unités argileuses ainsi que l'épaisseur des lits (faible à moyenne) dans ces deux formations sont probablement des indications d'un environnement de déposition moins profond, possiblement causé par un soulèvement lent (Levich, 1973).

Vers la fin du Crétacé, le soulèvement s'est fait à un rythme plus rapide. Sur le flanc SW de la Sierra de Santa Maria, des microgrès, des grès et des conglomérats reposent sur des lits de faible épaisseur et sur des unités argileuses, indiquant du tectonisme actif et un soulèvement rapide. Les grès et les microgrès contiennent des grains de plagioclase et des fragments de roches volcaniques, ces derniers indiquant une activité volcanique proximale, provenant probablement de la Sierra Madre Occidentale (Levich, 1973).

Les unités font partie d'une étape paléogéographique antérieure à l'orogénie laramienne et elles sont marquées par l'évolution d'un domaine marin dans lequel se déposent les séries sédimentaires caractéristiques de la Sierra Madre Orientale. Ces sédiments crétacés furent plissés selon une compression orientée NE - SW à la fin Crétacé - début Tertiaire (Levich, 1973). Le plissement a fait partie de l'orogénie laramienne affectant la Sierra Madre Orientale.

L'étape paléogéographique succédant à l'orogénie laramienne est marquée par une évolution en milieu continental et par l'importance des phénomènes volcaniques. Trois ensembles lithologiques peuvent être distingués. Le plus ancien est caractérisé par le dépôt d'un conglomérat post-laramien (Formation d'Ahuichila), ainsi que par l'épanchement d'une série volcanique, principalement andésitique et par la mise en place de corps intrusifs co-magmatiques. Cet assemblage ("complexe volcanique inférieur") contient des tufs et des coulées andésitiques d'une épaisseur d'environ 200 mètres, qui ont été datés par la méthode K-Ar à l'Eocène (51-40 Ma) (Aguirre-Diaz et McDowell, 1993) et à une période plus longue, localement dans les Sierras Madre

Occidentale et Orientale, soit 100 à 45 Ma (McDowell et Clabaugh, 1972; McDowell et Keizer, 1977).

Succédant au complexe volcanique inférieur, "le groupe volcanique supérieur" comprend principalement des rhyolites et des ignimbrites avec des quantités mineures de basaltes et d'andésites. D'ouest en est, l'épaisseur de ce complexe volcanique supérieur diminue et n'excède pas 500 mètres dans la région de Velardeña (Aguirre-Diaz et McDowell, 1993). Les données géochronologiques montrent que l'essentiel de la mise en place de ce second groupe volcanique s'est effectué durant une période assez courte, à l'Oligocène (34-29 Ma) (Gilmer et al., 1988) mais à l'échelle des Sierras Madres, cette période est légèrement plus longue, soit 34 à 23 Ma (McDowell et Clabaugh, 1972; McDowell et Keizer, 1977). L'ensemble lithologique le plus récent correspond à des basaltes (< 25 Ma) qui reposent localement sur des conglomérats continentaux.

La distribution des ressources minérales dans le centre-nord du Mexique (fig. 2) est grossièrement alignée selon un axe NW - SE que l'on nomme la ceinture argentifère du Mexique. Cette zone comprend plusieurs types de gisements. On retrouve principalement :

1. de gîtes à Ag-Pb-Zn-Cu dans des roches carbonatées. Ces gisements forment une série continue entre des minéralisations de relativement basse température et des minéralisations de type skarn;
2. de veines épithermales qui peuvent être subdivisées selon leur contenu métallique en veines polymétalliques à Ag-Pb-Zn (+ Au, Cu) ou en veines à Au-Ag; et
3. des stockworks à Ag-Pb-Zn.

Au Mexique, les veines épithermales représentent au minimum 40% de la production et des ressources, les gîtes polymétalliques 21% et les dépôts « disséminés » (stockwork) à peine plus de 3% (Pinet, 1999).

Les districts où les veines représentent la majorité de la production sont généralement caractérisés par plusieurs systèmes de veines, parallèles ou non. Dans le district de

Zacatecas, cinq systèmes de veines majeures, sub-parallèles, ont été exploités. Dans le district de Fresnillo, on compte plus de 150 veines, dix d'entre elles étant considérées comme majeures. À l'échelle de la ceinture métallifère du Mexique, l'orientation des veines est variable. Il est à noter que des systèmes de veines d'orientations différentes au sein d'un même district peuvent montrer de fortes variations de teneurs. Par exemple, dans le district de Zacatecas, le système NW - SE est riche en argent et métaux de base, alors que le système NNW - SSE est riche en or (Kock & Link, 1967).

L'une des caractéristiques marquantes des veines minéralisées est leur longueur, qui excède souvent 1 km. Dans certains cas, plusieurs segments de veine ont été distingués, mais ils appartiennent clairement au même système (Gross, 1975). La veine la plus continue est probablement la Veta Madre (district de Guanajuato) qui comporte 15 mines sur une longueur de près de 25 Km.

L'extension verticale minéralisée des veines varie entre 200 et 800 mètres. Cependant, les veines montrent typiquement une diminution de leur teneur en métaux précieux en profondeur et l'intervalle riche en or et / ou argent n'excède pas 500 à 600 mètres. La largeur des veines varie fortement d'un district à l'autre et au sein d'un même district (Pinet, 1999).

#### **1.1.b. District minier de Velardeña**

Le district minier de Velardeña est situé dans la ceinture argentifère du Mexique (fig. 2). Il se trouve à la limite SW de la province physiographique de Mexican Cross, la limite est de la Sierra Madre Occidentale et la limite NW du Mesa Central (fig. 3). Le district est situé aux marges des deux terrains tectonostratigraphiques du Sierra Madre Oriental et de Coahuila (Campa & Coney, 1984). Le district (qui comprend les Sierras de Santa Maria et de San Lorenzo) est composé de roches sédimentaires carbonatées d'âge Crétacé, intrudées par des plutons de composition acide à intermédiaire d'âge Tertiaire. Des roches volcaniques tertiaires sont en contact dépositionnel sur un conglomérat du fin Crétacé (lorsque présent) qui repose en discordance sur les unités antérieures.

Les formations sédimentaires affleurant dans le district minier de Velardeña furent toutes affectées par l'orogénie laramienne et sont décrites, pour des régions avoisinantes, dans

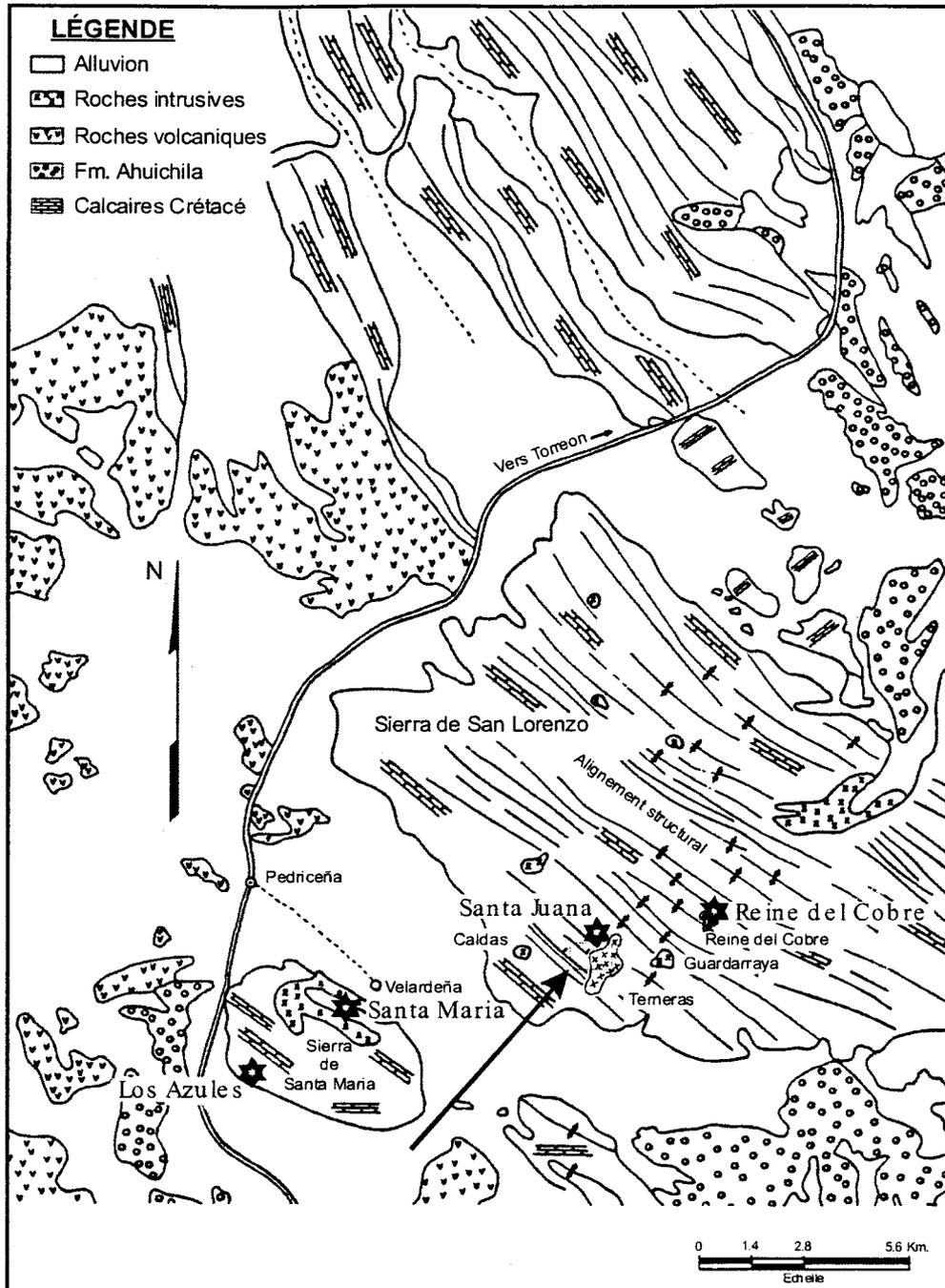
les articles de Imlay (1937), dans la thèse de Levich (1973) et la thèse de Tardy (1980), dans l'article de Gilmer et al. (1988) et dans l'article de Aguirre-Diaz et McDowell (1993). De la base au sommet, il s'agit des formations Aurora, Cuesta del Cura et Indidura.

La Formation Aurora possède une épaisseur de plus de 200m. Elle est d'âge Albien à Cénomaniens inférieur (Crétacé moyen). Elle est composée de calcaires siliceux, de couleur grise foncée à noir, interlitée avec une quantité mineure de dolomies. Les bancs sont généralement massifs et ont une épaisseur qui peut atteindre 3 mètres.

La Formation Cuesta del Cura possède une épaisseur de 0 à 290 m et correspond à des calcaires gris foncés à noir en bancs minces à moyens (10-20 centimètres), contenant des lentilles et des lits de silex noir. Cette formation est datée du milieu du Crétacé (Cénomaniens moyen à supérieur). Cette formation représente les calcaires crétacés que l'on retrouve partout sur la propriété de la mine Velardeña.

La Formation Indidura possède la plus grande épaisseur des unités sédimentaires dans la région de Velardeña, soit de 0 à 800 m. Elle correspond à des unités de schistes calcareux en lits minces (6 à 40 centimètres) interlitée avec des calcaires en lits minces qui reposent sur des litharénites. Cette formation est datée du Crétacé supérieur (Turonien à Coniacien).

Les roches intrusives de la Sierra de Santa Maria (McLeroy & Clemons, 1966) correspondent à des porphyres de trachyandésite qui forment deux masses majeures ainsi que des masses plus petites, des dykes et des sills. La biotite magmatique retrouvée dans ces porphyres fut datée à  $33.1 \pm 1.4$  Ma par la méthode K-Ar (Felder, 1979). La Sierra de Santa Maria forme le tiers NE d'une structure circulaire dont l'autre deux tiers est composé d'andésites, datées à 45 Ma par la méthode K-Ar (Gilmer et al., 1988). Spurr et Garrey (1908) interprètent la région autour de l'intrusif de la Sierra de Santa Maria comme étant un centre volcanique sur la base de l'existence d'un contact de brèche explosive entre les andésites et les unités crétacées sous-jacentes.



**Figure 5: Carte géologique du district minier de Velardeña (secteur étudié au bout de la flèche, dans le carré; les étoiles représentent les 4 mines en opération).  
Modifié de Hernández C.I. 1991.**

La propriété minière de la compagnie ÉcuSilver se trouve dans la Sierra de San Lorenzo (fig.5) On y retrouve d'importantes intrusions de roches dioritiques tandis que dans la Sierra de Santa Maria on retrouve un porphyre de trachyandésite quartzifère et des

roches andésitiques (Gilmer et. al., 1988). Les intrusions dans la Sierra de San Lorenzo paraissent irrégulières à première vue, mais lorsqu'on les examine plus attentivement, on s'aperçoit qu'elles s'orientent selon deux axes bien définis; un NE et l'autre NW.

Sur la propriété, plusieurs veines montrent des caractéristiques similaires telles que leurs largeurs uniformes et leurs relations avec l'encaissant. Le contenu en métaux de base et en métaux précieux et le niveau d'érosion varie cependant d'une veine à l'autre. Sur la propriété, nous avons divisé les veines en deux systèmes; un groupe de veines NW - SE (système Santa Juana) et un autre groupe est-ouest (système Terneras) (fig. 6).

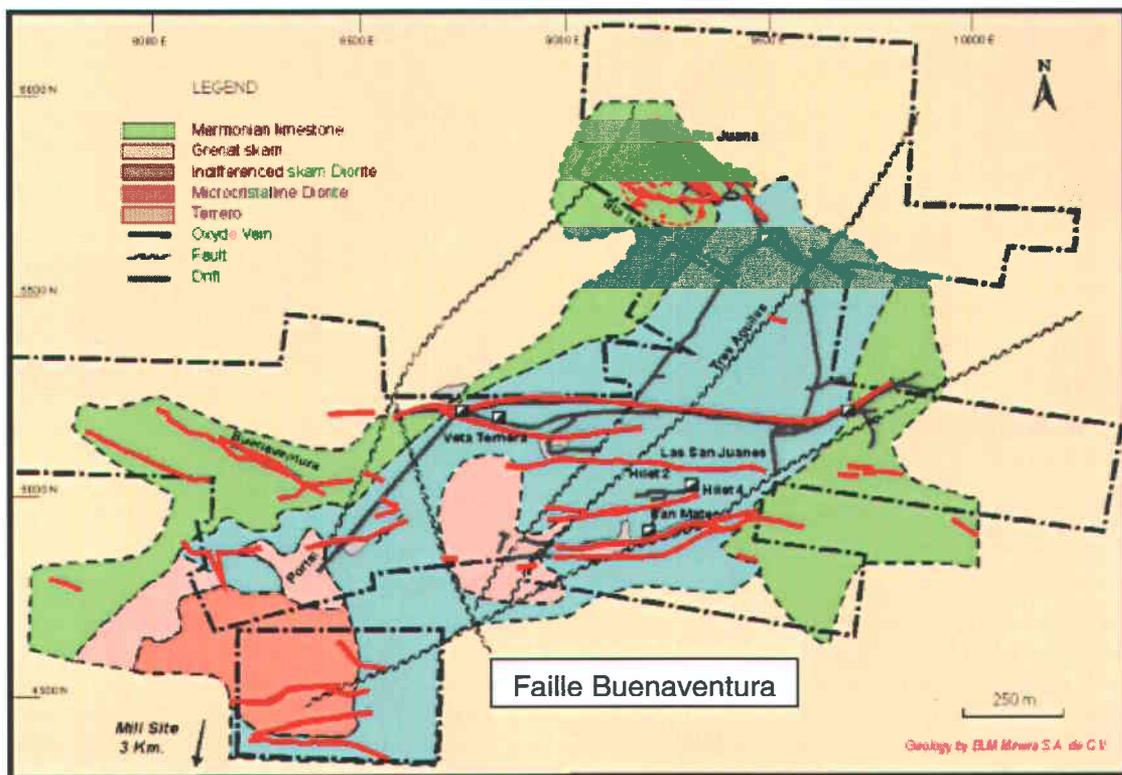


Figure 6 : Géologie préexistante de la mine et les environs. La propriété de la compagnie est en pointillé. (D'après BLM, 1999)

### 1.1.c. Historique minier du district

L'exploitation du district a débuté au XVI<sup>e</sup> siècle avec l'arrivée des Espagnols et a continué à petite échelle jusqu'en 1888, alors que la production atteignait en moyenne

400 à 500 tonnes/jour (Santillan, 1936). La Velardeña Mining and Smelting Company (VMSC) fut établie et une usine de traitement du minerai fut construite à cette époque. La American Smelting and Refining Company (ASARCO) a acquis la VMSC en 1902 et a construit une nouvelle usine de traitement. La production continua jusqu'en 1926 à un rythme de 2500 tonnes/jour. Les mines de Santa Maria, Temeras et Reina del Cobre étaient les principales exploitations de l'époque.

Une nouvelle période d'exploration et de développement des mines Santa Maria et Reina del Cobre fut initiée en 1968 par ASARCO, maintenant IMMSA (Industrial Minera de Mexico, sud.A.), Servicios Industriales Peñoles, sud.A. de C.V., Minera Ramid, sud.A., et Astumex, S.A. Les parts des propriétés de Minera Ramid et Astumex furent acquises par Peñoles au début des années 1980.

IMMSA débuta son exploitation de la Sierra de Santa Maria en 1980 au rythme de 600 tonnes métriques par jour, puis à 800 tonnes par jour vers la fin des années 80, soit 600 tonnes des gisements de la mine Santa Maria (de type remplacement skarnoïde de pyrite - sphalérite - chalcopryrite à proximité de l'intrusion) et 200 tonnes des gisements de minéralisation disséminée et de stockwork à arsénopyrite – galène – sphalérite - boulangérite de la mine Los Azules, les deux sur le flanc NE du dôme. Les autres types de minéralisation sont des gisements de remplacement de carbonate à pyrite - sphalérite - galène le long du contact entre les carbonates et des dykes rhyolitiques (propriété Peñoles) et un système de veines épithermales à pyrite – sphalérite – galène - boulangérite et sulfosels d'argent. Les teneurs moyennes sur la propriété de IMMSA sont de 3% Pb, 4% Zn, et 120 g/t Ag (Gilmer et. al., 1988). Sur la propriété Peñoles, les teneurs sont de 5% Zn + Pb et 4 g/t Ag (Gilmer et. al., 1988).

Aujourd'hui, les mines de Santa Maria, de Santa Juana (que l'on nomme mine Velardeña dans le présent ouvrage), de Reina del Cobre et de Los Azules (fig.5) sont toujours en opération.

## 1.2. Contexte géologique de la mine Velardeña

### 1.2.a. Historique de l'exploitation

Les données historiques avant l'acquisition de la propriété par ÉcuSilver sont très restreintes. La superficie totale de la propriété actuelle est de 229.74 hectares et comprend les groupes de claims Buenaventura, Velardeña, Pajaro Azul et Los Muertos. Les veines exploitées sur la propriété appartiennent au système de veines de Santa Juana et dans une moindre mesure à la veine Temeras.

La veine de Santa Juana fut étudiée au début du siècle par Spurr et Garrey (1908). Une analyse typique retournait 7 g/t Au, 690 g/t Ag, 5.9% Pb et 12.3% As. Ils notent également que cette veine est caractérisée par un rapport Au/Ag élevé (une analyse donne 107 g/t Au et 5.5 g/t Ag). En 1924, environ 37,000 tonnes furent extraites de cette veine avec une teneur moyenne de 5.9 g/t Au et 573 g/t Ag. Une exploitation à plus petite échelle a également eu lieu dans la zone de Santa Isabel (562 tonnes à 0.6 g/t Au et 401 g/t Ag) et dans la zone d' El Pilar (863 tonnes à 2.3 g/t Au et 162 g/t Ag). À la suite de la fermeture de la fonderie, la mine Santa Juana a été exploitée de façon intermittente et à petite échelle. L'exploitation de plusieurs veines associées à la veine Santa Juana, que l'on nommera maintenant le système Santa Juana, s'est fait à partir de 1969. La teneur moyenne était de 4 g/t Au, 396 g/t Ag, 5.9% Pb et 7.6% Zn.

Réserves	Tonnes	Ag g/t	Au g/t	Onces d'argent	Onces d'or
Prouvées et probables	824 171	237	3,57	6 280 660	94 607
Possibles	1 072 123	342	3,05	11 789 906	105 144
<b>Ressources</b>	<b>767 507</b>	<b>200</b>	<b>1,19</b>	<b>4 935 736</b>	<b>29 368</b>
<b>Total</b>	<b>2 663 801</b>	<b>269</b>	<b>2,8</b>	<b>23 006 302</b>	<b>229 119</b>

**Tableau 1: Réserves et ressources de la mine Velardeña (données de BLM, 1999)**

La veine Temeras fut exploitée intensément au début du 20<sup>e</sup> siècle (1902-1926), et à plus petite échelle par la suite. D'après Spurr et Garrey (1908), la teneur moyenne de cette veine était de 3.5 g/t Au, 835 g/t Ag et 3.8% Pb. Des données de production pour la période de 1920 - 1924 montrent une teneur moyenne de 4 g/t Au, 420 g/t Ag, 0.3% Cu, 2.1% Pb et 2.5% Zn.

Selon le rapport annuel d'ÉcuSilver pour l'année 2000, la compagnie a usiné environ 100 000 tonnes de minerai, (environ 150 000 onces d'Ag et 4 000 onces d'Au) la majorité de ce minerai provenant des tas de débris à faible teneur, réévalués à cette époque comme économiques. Les valeurs des réserves (données de 1999) et des teneurs des veines de la mine et les teneurs des veines non exploitées se trouvent dans les tableaux 1 et 2.

Veine	# d'éch.	# d'ana. inc. Pb	# d'ana. inc. Zn	Au	Ag	As	Cu	Pb	Zn	Ag				
										Ag/Au	Pb/Zn	Ag/Pb	Ag/Zn	(Pb+Zn)
(unités)	(#)	(#)	(#)	(g/t)	(g/t)	(g/t)	(%)	(%)	(%)					
Sta. Juana	3154	1188	1712	8,8	449,5	4,41	0,57	3,97	2,93	50,9	1,4	113,1	153,6	65,13
Sn. Juanes	255	134	279	13,7	983,2	-	2,83	0,50	0,50	71,7	1,0	1969,1	1957,6	981,67
Sn. Mateo	546	160	408	3,0	468,3	-	0,20	3,63	2,25	157,6	1,6	129,0	207,8	79,61
P. Pinto	110	0	31	0,7	281,0	-	0,02	-	0,64	384,0	0,0	-	439,1	439,11
Ternereras	20	20	20	2,5	325,3	-	0,12	0,97	1,31	131,0	0,7	336,5	249,1	143,15
Buenaventura1	89	0	0	0,3	136,6	0,17	-	-	-	448,6	-	-	-	-
Buenaventura2	16	1	1	1,4	170,5	0,22	0,01	0,60	1,30	123,3	0,5	284,2	131,2	89,74
Buenaventura3	6	1	1	1,6	208,9	0,34	0,04	2,60	0,70	131,8	3,7	80,3	298,4	63,30
Ordenanza1	59	15	15	1,0	385,5	0,37	0,14	9,87	0,32	383,9	30,7	39,1	1199,4	37,82
Ordenanza2	18	2	2	0,6	58,5	0,18	0,04	0,80	0,30	93,5	2,7	73,1	194,9	53,16
Viborillas	2	2	2	1,0	265,0	-	0,16	0,50	0,55	265,0	0,9	530,0	481,8	252,38
Roca Negra	3	2	2	0,0	245,0	-	-	0,86	0,26	-	3,3	-	-	-

Tableau 2: Teneurs des veines de la propriété minière Velardeña et rapports de certains métaux. (Les concentrations en cuivre se trouvent sur la limite du seuil de détection.)

Le système de veines Santa Juana représente le corps minéralisé en exploitation aujourd'hui. La mine développe actuellement le potentiel que l'on retrouve dans certaines des autres veines de la propriété (Ternereras, San Juanes, San Mateo).

### 1.2.b. Nature des roches encaissantes

La propriété de la mine Velardeña est composée de roches sédimentaires crétacé, de roches intrusives tertiaires et de roches métamorphiques tertiaires. Les roches sédimentaires que l'on retrouve ici appartiennent principalement aux formations de Cuesta del Cura et d'Indidura qui sont composées majoritairement de calcaires.

Les observations de terrain de Pinet (1999) de même que les travaux de Spurr et Garrey (1908) et Gilmer et al. (1988) permettent de distinguer plusieurs types de roches intrusives. Le magma de composition dioritique responsable de leur formation montre un certain degré de différenciation, de telle sorte que parmi les trois intrusions

principales, une première appartient au champ des diorites (intrusion de Terneras). Cette intrusion mafique contient beaucoup de minéraux ferromagnésiens (surtout augite et biotite, hornblende rare). Spurr et Garrey (1908) et Spurr (1923) décrivent l'intrusion de Terneras comme une roche finement grenue, de couleur foncée, qui contient du mica et possède une structure aplitique à granulaire. C'est le pluton le plus important en terme de volume. Il affleure sur le flanc ouest de la Sierra de San Lorenzo et couvre une partie de la propriété d'ÉcuSilver traitée dans cette étude. Il forme une masse légèrement allongée selon un axe NE où il affleure sur une distance d'environ 2,5 kilomètres. Des roches provenant possiblement du même épisode magmatique (volcanisme andésitique), de l'autre côté de la vallée de Cuencame, sont datées à 45 Ma par la méthode K/Ar (Gilmer et al., 1988).

L'intrusion de Guardarraya diffère de l'intrusion de Terneras par sa couleur plus claire et son aspect granulaire. Elle contient du feldspath, de la biotite, de la hornblende, de l'augite, du quartz, de la magnétite et du sphène (Spurr, 1908). Les roches de l'intrusion de Guardarraya appartiennent aux champs des diorites quartziques ou des monzonites quartziques (Spurr et Garrey, 1908).

L'intrusion de Copper Queen (Reina del Cobre) est de couleur claire, porphyrique, avec de nombreux phénocristaux et peu de matrice. Cette intrusion felsique contient peu de minéraux ferromagnésiens (surtout biotite, aussi hornblende et augite) et appartient au champ des monzonites quartziques (Spurr et Garrey 1908). On retrouve des gradations minéralogiques dans chacune des intrusions (par exemple, il y a des amas plus felsique de roches de type Guardarraya dans l'intrusion de Terneras); donc il est probable qu'elles représentent des variations d'un seul magma.

Il est intéressant de noter la forme des intrusions. L'intrusion de Terneras est une masse allongé, uniforme, orienté selon un axe NE - SW tandis que les intrusions de Guardarraya et de Copper Queen (la plus au NE sur la figure 9) forment deux corps magmatiques distincts, chacun composées de quelques masses allongé selon une orientation NW – SE. La forme de l'intrusion de Terneras suggère que celle-ci n'a pas été contrôlé par une tectonique extensive, tandis que les intrusions de Copper Queen et de Guardarraya l'on été, à des degrés variables. Cette tectonique extensive a débuté il y a environ  $30 \pm 2$  Ma (Aguirre-Diaz et McDowell, 1993). Ceci concorde avec l'âge de

mise en place des intrusions les plus riches en quartz (Santa Maria, Copper Queen et Guardarraya). L'intrusion de Santa Maria a d'ailleurs été datée à  $33.1 \pm 1.4$  Ma (Gilmer et al., 1988). L'intrusion de Guardarraya est plus vieille, mais compte tenu de son caractère syn-tectonique, elle est probablement d'âge début Oligocène. L'intrusion de Terneras pourrait donc : 1) être d'âge Éocène, donc contemporaine de la série volcanique inférieure, datée dans la région de Nazas entre 51 et 40 Ma (Aguirre-Diaz et McDowell, 1993) ou; 2) provenir du même événement magmatique que l'intrusion de Guardarraya.

Les skarns que l'on retrouve sur la propriété proviennent du métamorphisme des roches carbonatées et plutoniques, soit sous forme d'exoskarn et d'endoskarn respectivement. Ils se caractérisent principalement par leur contenu élevé en grenat vert, probablement du grenat grossulaire.

### **1.2.c. Contexte lithologique et structural des zones exploitées**

La propriété d'ÉcuSilver actuellement exploitée (fig. 6) comporte plusieurs veines minées en profondeur qui se trouvent dans le mur de la faille Buenaventura. Parmi celles qui présentent un intérêt particulier, la veine Terneras (Veta Terneras sur la fig. 6), d'orientation est-ouest, a été largement exploitée dans le passé et nous donne une bonne indication de l'étendue verticale et horizontale de l'intervalle minéralisé. Sub-parallèles à la veine Terneras sont les veines San Juanes et San Mateo lesquelles, ensemble, contiennent environ 45% des réserves actuelles, prouvées et probables, de la mine. À environ 500 mètres au nord de la veine Terneras se situe le système de la veine de Santa Juana, laquelle est la plus importante pour les opérations courantes en 1999-2000. Il contient la majorité des réserves et c'est la seule zone de la propriété à être exploitée actuellement. Ces veines recoupent le contact entre l'intrusion de Terneras (qui est par endroit skarnifiée) et les calcaires, même si la partie productrice est essentiellement encaissée dans l'intrusion. Une autre faille, la faille Tres Aguillas, recoupe le système Santa Juana selon une orientation NE - SW, et montre un déplacement apparent sénestre.

### **1.3. Problématique des travaux**

Bien que les chantiers actuels de la mine Velardeña soient restreints au mur de la faille Buenaventura, il existe aussi plusieurs veines minéralisées, ayant été minées de façon artisanale dans le passé, dans le toit de cette faille, i.e. Buenaventura 1,2, et 3; Ordenanza 1 et 2, Viborillas, etc. À priori, ces veines minéralisées représentent des structures équivalentes à celles exploitées dans la mine mais proviennent d'un niveau structural supérieur ayant été déplacé par le jeu normal de la faille Buenaventura. Bien que ces veines aient été exploitées antérieurement, les teneurs actuelles ne peuvent justifier une mise en chantier. Cependant, s'il est démontré qu'elles représentent effectivement des structures corrélatives aux veines minées à l'est de la faille Buenaventura, et si le déplacement vertical le long de cette faille et des structures associées est quantifiable, le potentiel minier des veines du toit de la faille Buenaventura en profondeur pourrait représenter un potentiel économique d'intérêt en termes de ressources et/ou de réserves.

Au cours de l'été 1999, nous avons donc initié des travaux de maîtrise centrés sur la problématique des veines et des structures caractérisant le toit de la faille Buenaventura sur le site de la mine Velardeña. Les principaux objectifs du projet ont été (i) de préciser l'orientation et la nature des principales veines minéralisées situées dans le toit de la faille Buenaventura, (ii) de déterminer la nature, l'orientation et la géométrie tridimensionnelle des nombreuses failles cassantes recoupant ces veines minéralisées, et (iii) de proposer des corrélations entre ces veines et les structures minéralisées de la mine Velardeña et ainsi obtenir un profil vertical du système minéralisé dans cette partie du district minier de Velardeña.

### **1.4. Méthodologie et présentation des résultats**

Les travaux de terrain ont été réalisés au cours des mois de mai, juin et juillet 1999. Les résultats de ces travaux de cartographie sont présentés sur la carte géologique en appendice. Le secteur étudié représente une superficie de 1,5 km par 1 km. Il est limité à l'est et à l'ouest par les failles Buenaventura et Ordenanza qui sont deux structures sub-parallèles de même nature. Nous avons travaillé à partir de la carte géologique de

BLM (version du 26/01/99) et réalisé une vérification détaillée de la localisation et de la nature des structures géologiques répertoriées sur cette carte, ainsi que des infrastructures (routes, pistes) existantes. Les principales activités réalisées au cours des travaux de terrain sont les suivantes:

- identification des veines et des failles cassantes les recoupant et sélection de points d'arpentage afin d'obtenir une localisation la plus précise possible;
- description macroscopique des structures minéralisées et des structures tardives et échantillonnage systématique;
- construction d'une banque de données structurales et report de ces données sur la carte géologique annexée à ce rapport;
- échantillonnage sélectif des différents faciès (sulfures et oxydes) des veines minéralisées du mur et du toit de la faille Buenaventura pour description minéragraphique comparative;
- échantillonnage sélectif de différentes veines du toit de la faille Buenaventura pour analyses des métaux (résultats incluent au tableau 2 de ce rapport).

Par la suite, nous avons entamé différents travaux de laboratoire. En premier lieu, nous avons effectué une analyse des données structurales et numérisé la carte géologique compilée à partir de données provenant des travaux de terrain en utilisant le CAD MicroStation™. Ensuite, nous avons utilisé la méthode Angelier (1989) pour procéder à une analyse structurale des contraintes ayant engendré les structures cassantes de la mine. De plus, nous avons effectué le calcul du rejet sur la faille Buenaventura, par la méthode géométrique, i.e. en utilisant le pendage de la faille et la direction de transport indiquée par les stries de glissement.

Nous avons aussi effectué une analyse microscopique des échantillons recueillis (32 échantillons) de même qu'une analyse à la Microsonde de certains de ceux-ci (8 échantillons). Cette description minéragraphique nous a permis de mieux cerner les corrélations envisagées. Nous avons ensuite construit plusieurs blocs diagrammes en 3D pour chacune des 4 zones d'intérêt et puis nous les avons regroupées en un bloc (chapitre 4.3, fig.13).

Nous avons également effectué une analyse statistique de la base de données des analyses des métaux dans le but de proposer des corrélations de veines s'appuyant aussi sur des similarités dans leur contenu métallifère. Finalement, nous avons procédé à une reconstruction géométrique en trois dimensions, en se basant sur :

- le rejet minimum visible par rapport à l'épaisseur de la séquence rhyolitique abaissée vers l'ouest par la faille Ordenanza,
- le rejet calculé sur la faille Buenaventura,
- le rejet estimé sur les failles subsidiaires, et
- les corrélations proposées.

## 2. LA PROPRIÉTÉ VELARDEÑA

### 2.1. Roches-hôtes

Dans cette section, nous allons traiter des différentes lithologies que l'on retrouve sur la propriété minière de Velardeña. Celles-ci incluent des roches carbonatées crétacées, l'intrusion tertiaire de Terneras, des skarns et des rhyolites tertiaires (fig. 7). Nous avons aussi fait une coupe composite, A-A' et B-B', pour mieux comprendre la structure en profondeur des différentes lithologies recoupées par les nombreuses failles sur la propriété (fig. 8).

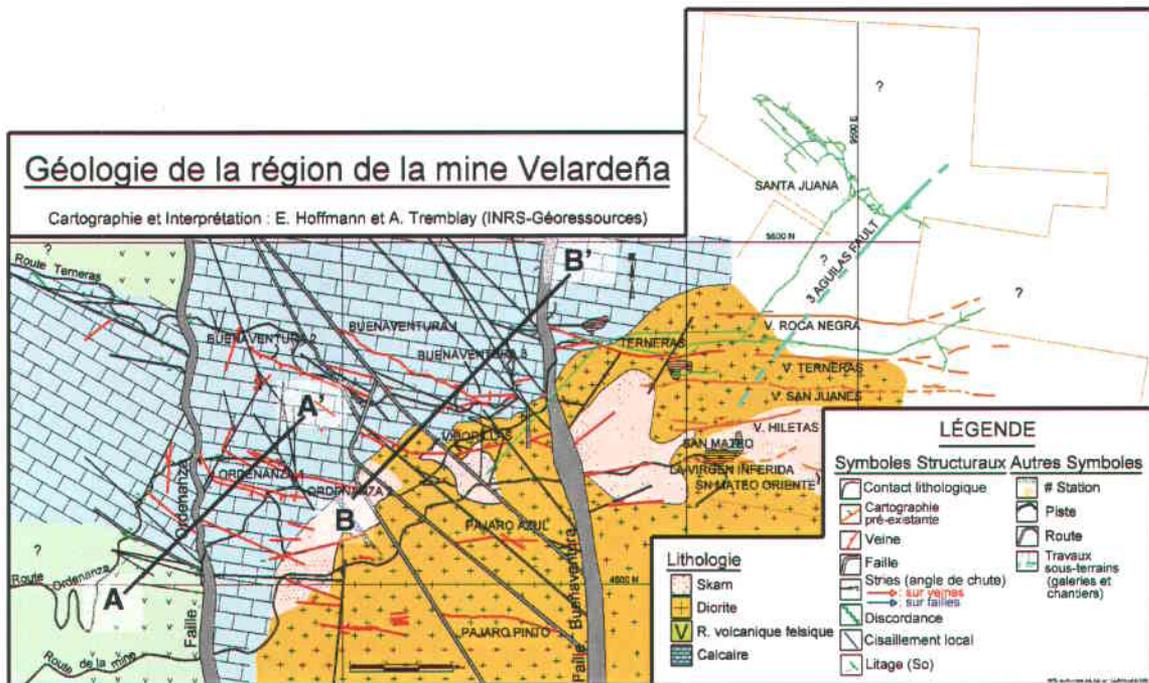
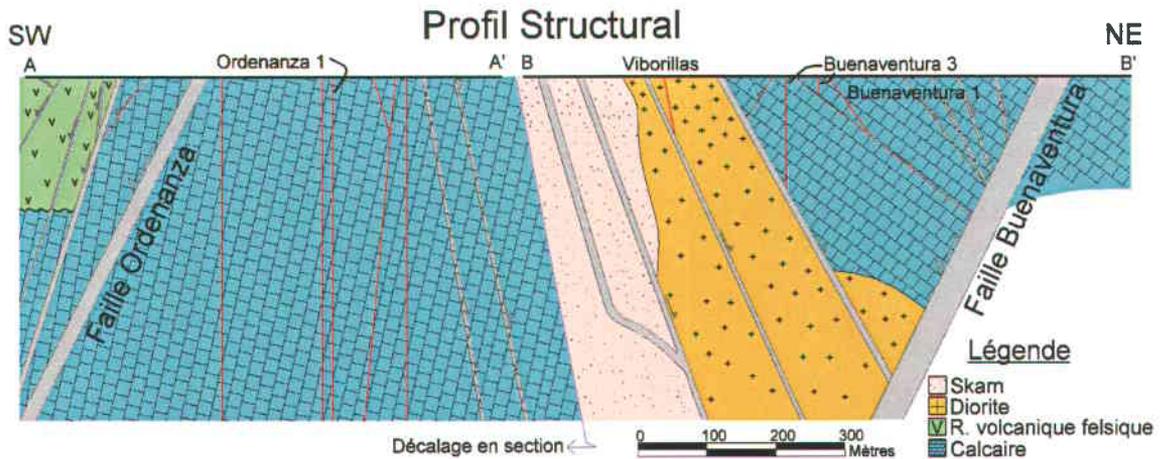


Figure 7 : Carte géologique avec la trace de la coupe composite A-A' et B-B'.

Sur cette coupe composite (fig. 8), on voit que les failles subsidiaires découpent le toit de la faille Buenaventura en une série de blocs s'effondrant vers le NE. Nous n'avons pas de contrôle en profondeur sur la position structurale des lithologies; celle-ci est inférée d'après la cartographie en surface.



**Figure 8 : Coupe Composite A-A' et B-B' dans le toit de la faille Buenaventura.**

### **2.1.a. Les roches mésozoïques**

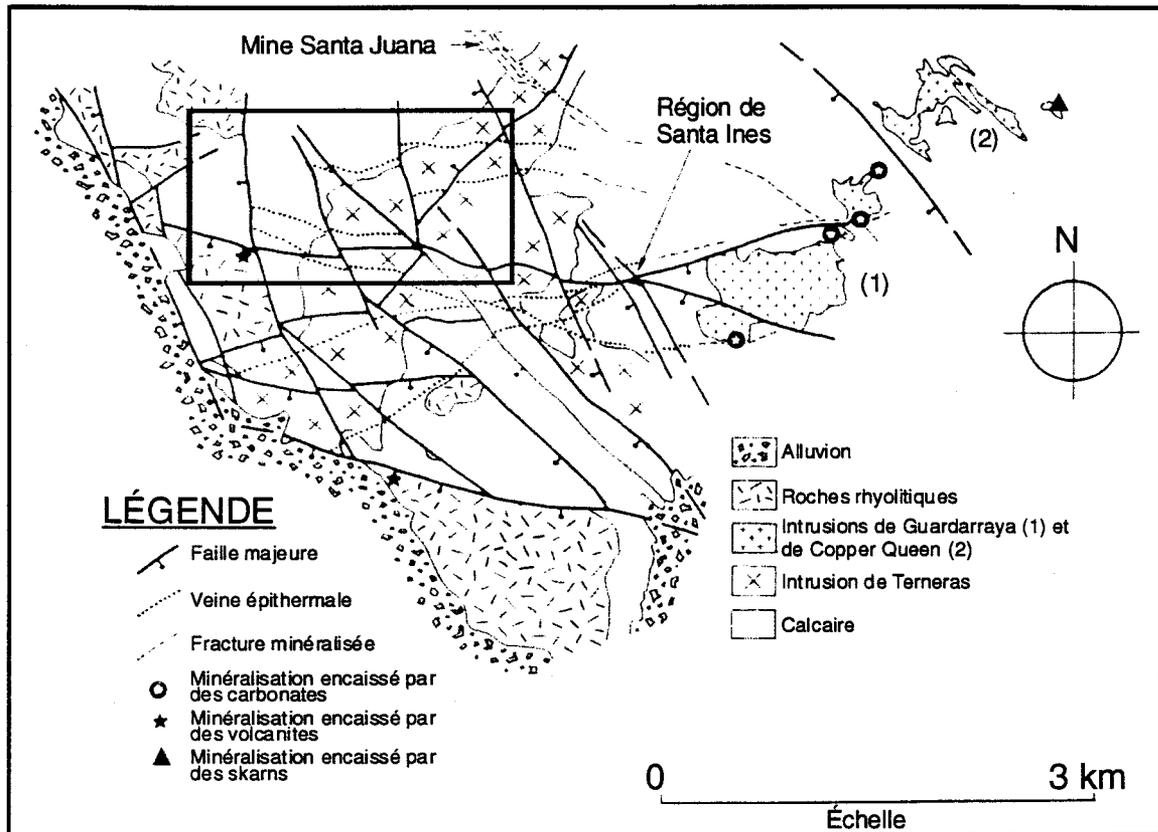
La formation sédimentaire affleurant sur la propriété minière est la formation de Cuesta del Cura. Cette formation correspond à des bancs de calcaires gris foncés de 10-20 centimètres, recoupés par des veinules de calcite sans orientation préférentielle. Ces calcaires sont finement laminés, micritique, localement bréchique et contiennent des lentilles de silex noir. À proximité de l'intrusion Terneras, les calcaires sont skarnifiés.

### **2.1.b. Les roches intrusives**

Tel que décrit dans la section 1.2b, il y a 3 intrusions de composition variable dans et/ou près de la propriété de la mine Velardeña (moins de 5 km) telle qu'on les voit sur la figure 9. L'intrusion de Terneras est la seule qui se trouve dans la zone cartographiée. Certaines parties de l'intrusion sont plus feldspathiques, et donc sont de couleur plus claire. Selon Spurr (1923), un échantillon typique montre l'assemblage suivant : feldspath + augite et magnétite dans une matrice de feldspath + augite + apatite. Spurr et Garrey (1908) décrivent également des pyroxènes incolores et des silicates de calcium, dont certains ont été définis pour la première fois dans la mine de Terneras (Wright, 1908).

Nos observations microscopiques de l'intrusion de Terneras sont en accord avec la minéralogie décrite par Spurr (1923): plagioclase + clinopyroxène + amphibole + biotite,

avec une petite quantité de minéraux opaques. Tous les cristaux sont de taille inégale et phanérotique (1 à 5 mm). Terneras appartient au champ des diorites. L'intrusion de Terneras a causé le métamorphisme des calcaires encaissants (exoskarn), mais également des roches intrusives (endoskarn). Les skarns sont caractérisés par un contenu élevé en grenats.



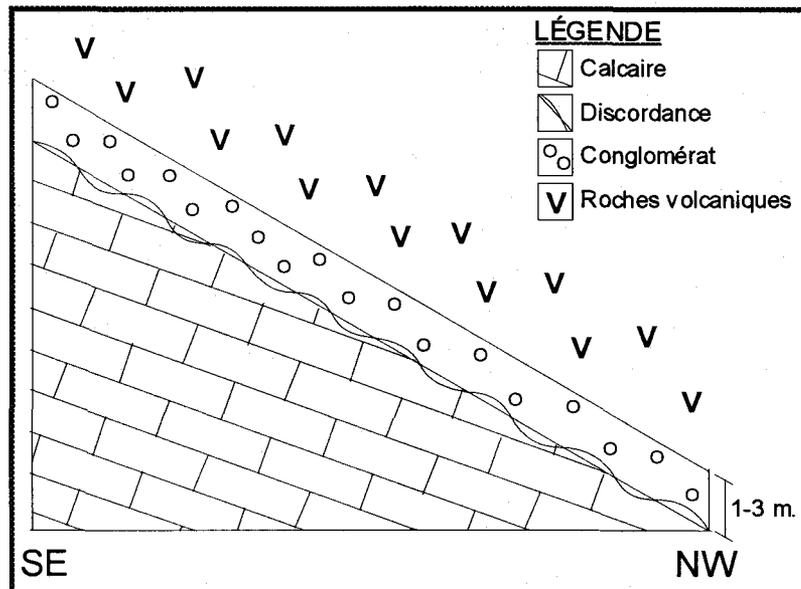
**Figure 9: Carte géologique de la partie SW de la Sierra de San Lorenzo. Zone d'étude encadrée. Modifié de Pinet (en préparation).**

Les roches de ces trois intrusions représentent un changement graduel d'une diorite vers une monzonite quartzique. L'intrusion de Terneras, de couleur foncé, possède beaucoup de minéraux ferromagnésiens, l'intrusion de Guardarraya, de couleur plus claire, possède moins de minéraux ferromagnésiens et l'intrusion de Copper Queen, de couleur très claire, possède peu de minéraux ferromagnésiens. La phase aplitique tardive qui recoupe l'intrusion de Terneras ressemble en composition de l'intrusion de Guardarraya, ce qui suggère que celle-ci est plus jeune que l'intrusion de Terneras et

provient possiblement d'un épisode de différenciation magmatique du magma Terneras (Spurr et Garrey 1908).

### 2.1.c. Les roches tertiaires

Le conglomérat d'Ahuichila correspond aux premiers dépôts postérieurs aux déformations laramiennes avec un âge probable Paléocène. Cette unité d'une épaisseur entre 0 à 130 m, est formée de dépôts de cône alluvial cimenté avec des fragments sub-angulaires à sub-arrondies de calcaires, de dolomie et de chert. Selon Gilmer et al. (1988), ce conglomérat affleure sur le flanc SW de la Sierra de Santa Maria et tel qu'on le voit dans la figure suivante (fig. 10), également sur le flanc SW de la Sierra de San Lorenzo (EH-1 et EH-17), où il repose en discordance sur les calcaires crétacés.



**Figure 10: Représentation schématique du contact discordant entre les calcaires et les conglomérats, tel que visible à l'arrêt EH-01.**

Des roches volcaniques rhyolitiques affleurent aussi sur le flanc ouest de la Sierra de San Lorenzo (Appendice A, planche 2, photo A). L'altération donne à ces roches une couleur ocre, orange et brune. Ces roches recouvrent en discordance les roches sédimentaires décrites ci-haut. On retrouve des structures minéralisées mineures dans les rhyolites affleurant dans le toit de la faille Ordenanza. Ces veines d'orientations et

de pendages variés possèdent des caractéristiques différentes des veines minéralisées du toit de la faille Buenaventura. Ces rhyolites appartiennent à la série volcanique supérieure, datée dans la région de Nazas à 30 Ma (Aguire-Diaz et McDowell, 1993) et plus régionalement entre 32 et 23 Ma (McDowell et Clabaugh, 1972; McDowell et Keizer, 1977).

## **2.2. Structures-hôtes**

Dans cette section, nous allons présenter les caractéristiques minéralogiques et structurales des veines dans le mur de la faille Buenaventura (voir carte géologique en appendice pour la localisation de chacune de ces veines). Certaines de ces veines sont exploitées par ÉcuSilver sur la propriété Velardeña.

Les principales structures minéralisées de la mine Velardeña comprennent le système de veines Santa Juana et les veines de Terneras, San Juanes et San Mateo de même que les veines Roca Negra et Hiletas. La minéralisation se présente sous forme de veines épithermales à Ag-Pb-Zn-Cu-Au, relativement étroites et à pendage abrupt. La largeur des veines peut varier de quelques centimètres jusqu'à plus de deux mètres mais elles sont typiquement de 20 et 80 centimètres. Des largeurs allant jusqu'à 8 mètres ont été décrites dans les cheminées minéralisées du système de veines de Santa Juana. Les veines sont continues sur des distances allant de 200 m. à plus de 1 km.

### **2.2.a. Zone de Santa Juana**

La zone Santa Juana se trouve au nord de la propriété. Elle se localise entre 5 500N – 6 000N et 9 200E – 9 800E sur la carte géologique en appendice. Ce système de veines possède une longueur de plus de 400 mètres et a été exploité sur un intervalle vertical allant jusqu'à 400 m.

Dans les calcaires, le minerai de la partie supérieure de l'intervalle minéralisé de la veine est de type oxydé (depuis environ 250 m. sous la surface) jusqu'au niveau 17 ou 18 (environ 500 m. sous la surface); en -dessous on retrouve du minerai sulfuré.

Dans les roches intrusives et les skarns, le minerai est de type sulfuré. On retrouve du minerai oxydé dans les roches intrusives seulement près du contact avec la faille Tres Aguilas. L'analyse microscopique effectuée sur 4 lames minces nous révèle que le minerai se compose principalement de pyrite (55%), d'arsénopyrite (25%) et accessoirement de galène (3%), de sphalérite (traces), et de chalcopryrite (traces) et que les minéraux de gangue (calcite et quartz) représentent généralement moins de 20% du volume de la veine. Spurr et Garrey (1908) rajoute de la jamesonite et de la tétrahédrite à la liste de sulfures que l'on retrouve dans la veine. Nous avons également observé de la malachite et de l'azurite dans la veine Santa Juana, *sensu stricto*, sous terre (Appendice A, planche 6, photo D).

Sur une base géométrique, on reconnaît trois types de veines à l'intérieur du système de Santa Juana : des veines courbes, d'orientation NNW, telle la veine Santa Juana, des veines linéaires d'orientation NW, à pendage abrupt (65-85°) vers le NE et des veines orientées est-ouest avec pendage vers le sud (nommé les "Trans"). La largeur moyenne de ces veines est de 0.45 mètre avec des teneurs moyennes de 8,83 g/t Au, 449,5 g/t Ag, 4,41% As, 0,57% Cu, 3,97% Pb et 2,93% Zn sur 3 164 analyses (tableau 2). Il est important de noter que les métaux de bases n'ont pas toujours été analysés. L'analyse à la microsonde montre que la galène contient entre 1502 ppm – 4348 ppm Ag.

Le système de veines Santa Juana contient beaucoup d'arsenic. D'ailleurs, Spurr et Garrey (1908) ont remarqué que les veines du district riches en arsenic étaient également riches en Au. Pinet (1999) a montré que le coefficient de corrélation entre l'or et l'arsenic pour toutes les analyses n'était que de 0.28. Cependant, le contenu en arsenic peut varier beaucoup d'une veine à l'autre et, dans certains cas, le coefficient de corrélation est plus élevé (0.5 pour la veine Santa Juana (données du tableau 2)).

Pour ce qui est de la veine Santa Juana *sensu stricto*, aux niveaux 12 et 14, la veine NNW Santa Juana est recoupée par les veines plus linéaires d'orientation NW du même système. Ceci suggère que la veine Santa Juana proprement dit correspond à une période antérieure de minéralisation (Pinet, 1999). D'autres éléments comme : 1) La différence d'élévation de la zone minéralisée (la veine Santa Juana affleure en surface); 2) une minéralogie distinctive (abondance de galène) et 3) l'absence de contrôle structural (la veine Santa Juana n'est pas délimitée par des plans de faille) viennent

appuyer l'hypothèse d'un épisode minéralisateur distinct pour la veine Santa Juana. Pour les autres veines de la propriété, il n'y a pas d'arguments avancés pour soutenir l'hypothèse qu'il y ait eu plus d'un événement hydrothermal minéralisateur. Les relations de recoupement mutuel entre les veines NW et E-W (le premier groupe peut recouper les veines du second groupe à un endroit, et puis être lui-même recoupé à un autre endroit) nous indiquent qu'ils sont contemporains et qu'ils forment un système de veines conjuguées (Pinet, 1999).

### **2.2.b. Veine de Terneras**

La veine de Terneras est la structure minéralisée qui a été la plus exploitée sur la propriété de la mine Velardeña, sur sa longueur (plus de 1100 mètres) et en profondeur (un intervalle de 550 mètres). Elle a une orientation moyenne de  $260^\circ / 75^\circ$  et recoupe le contact entre les roches intrusives et les calcaires. Sa largeur varie de 0.3 à 2 mètres. Cette veine est localisée à 5200N et entre 8600E – 10,000E, entre les veines Roca Negra et San Juanes.

L'analyse microscopique de cette veine, effectuée sur 2 lames minces, montre qu'elle contient du quartz (70%), de la tétrahédrite (15%), de la galène (10%) et accessoirement de la pyrite, de la chalcopryrite et de la sphalérite.

Nous présentons ici une séquence de cristallisation, originalement proposé par Spurr et Garrey (1908) dans leur étude de cette veine où ils ont distingué plusieurs phases de cristallisation, modifié suite à nos observations microscopiques :

1. De la chalcopryrite aphanitique avec de la pyrite à texture cellulaire, dans une gangue de quartz équi-granulaire. La pyrite est remplacée par la tétrahédrite.
2. De la galène et de la sphalérite à grain grossier, avec peu de chalcopryrite. Les observations microscopiques montrent que la sphalérite est recoupée par plusieurs veinules tardives de tétrahédrite.

3. De la tétrahédrite hypidiomorphe, qui remplace la pyrite et la chalcopryrite. Nous avons également trouvé un grain d'or natif dans une des lames minces de cette veine.
4. Des carbonates et du quartz montrant des textures crustiformes et colloformes avec des quantités mineures de sulfure tardifs. Ces carbonates contiennent des quantités variables de fer, de manganèse et de magnésium.
5. De la calcite stérile à grain grossier, d'une couleur blanc laiteux à brunâtre, témoignant de la présence d'inclusions de fer.

### **2.2.c. Veine de San Juanes**

La veine de San Juanes est continue sur une distance minimale de 900 mètres. Elle est sub-parallèle à Terneras (au nord) et San Mateo (au sud) avec un pendage abrupt vers le nord (80-87°). Cette veine est localisée aux coordonnées 5100N entre 8800E – 10,200E.

Cette veine est large de 5 à 30 cm en moyenne dans l'intrusif et les skarns et contient des teneurs très élevées en métaux précieux, soit jusqu'à 229 g/t Au et 9880 g/t Ag. La teneur moyenne pour 254 échantillons analysés (par BLM) est de 15.7 g/t Au, 1108.5 g/t Ag, 3.17% Cu, 0.4% Zn et 0.34% Pb sur une largeur moyenne de 0.18 mètre (tableau 2). Cette veine est marquée par des quantités beaucoup plus important de Cu que de Zn et de Pb. Le minerai est de nature mixte (sulfures et oxydes) à l'ouest de la faille Tres Aguillas et il est composé uniquement de sulfures à l'est de cette faille, dans l'intrusif et dans les skarns.

Sur 2 lames minces, nous avons observé un assemblage minéralogique composé de pyrite (35%), chalcopryrite (10%), tétrahédrite (25%) et covellite (5%) et le reste en gangue (25%) (Appendice A, planche 8, photos A, B et C). Sous terre, nous avons également observé la présence de carbonates de cuivre (malachite et azurite). Pinet (1999) rapporte de petites quantités de cuprite, bornite, galène, arsénopyrite et d'oxydes de fer. La tétrahédrite remplace la chalcopryrite et la pyrite. La covellite remplace la

chalcopryrite et la tétrahédrite. La gangue est composée de calcite et de quartz. L'analyse à la microsonde montre des valeurs de 17,000 ppm Ag dans la tétrahédrite.

#### **2.2.d. Veine de San Mateo**

Cette veine est continue sur une distance minimale de 600 mètres et fut minée sur un intervalle vertical de 300 mètres. Elle a une orientation de N263° avec un pendage entre 70° - 80° vers le nord dans un encaissant majoritairement composé de roches intrusives et de skarns. Elle est localisée à 4900N, entre 9000E – 9250E, au sud des veines Hiletas et San Juanes.

Aux niveaux supérieurs de cette veine, le minerai est de type mixte et/ou sulfuré, avec de la cérusite, anglésite, pyrargyrite, malachite, des oxydes de fer (limonite-goethite), oxydes de manganèse, de la galène, sphalérite, chalcopryrite et pyrite (Pinet, 1999). La zone de transition entre le minerai oxydé et sulfuré se fait environ 165 mètres sous terre.

Sur 546 échantillons analysés (par BLM), San Mateo retourne des concentrations moyennes de 3 g/t Au, 468,3 g/t Ag, 0,2% Cu, 3,6% Pb et 2,3% Zn sur une largeur moyenne de 0.62 m (tableau 2).

L'étude d'une lame mince indique la présence de pyrite (3%), d'arsénopyrite (2%), de covellite (traces), d'argentite (?), d'oxydes de fer (35%), de quartz (25%), de carbonates de Pb (30%), d'actinote (5%) et de calcédoine (traces). Ces observations ont été confirmé par analyses à la microsonde.

#### **2.2.e. Autres veines**

La veine Roca Negra est localisée à 5300N, entre 9000E – 10,000E. Elle se trouve au nord de la veine Terneras et au sud du système de veines de Santa Juana. Elle est caractérisée par un contenu en métaux précieux très variable. Sa largeur varie entre 0,05 et 2 mètres avec une moyenne de 0,5 mètre sur une longueur d'environ 1 km en surface. Environ 150m. sous terre, le minerai est de type sulfuré. Trois analyses de 1986 (BLM, 1986) donnent une teneur moyenne de 245 g/t Ag, 0.86% Pb et 0.26% Zn (tableau 2).

Les veines Las Hiletas (au sud de San Juanes) correspondent à deux veines parallèles qui ont la même direction que les veines Terneras et San Mateo. Ces veines furent exploitées sur un intervalle vertical de moins de 100 mètres (du à sa faible largeur (5-10 cm)). Le minerai n'est oxydé qu'en surface et il montre plusieurs caractéristiques similaires à la veine San Juanes; un assemblage minéralogique observé à partir d'une lame mince qui est composé de pyrite (35%), de calcédoine (25%), de quartz (15%), de chalcopryrite (7%), de chalcosite (5%), d'oxydes (8%), de barite (4%), de galène (1%) et de covellite (traces).

La veine La Virgen Inferida se trouve au sud de la veine San Mateo. Sur une analyse de 132 échantillons (par BLM), on retient une largeur moyenne de 0,95 mètre avec 1,74 g/t Au et 102,7 g/t Ag.

### **2.3. Interprétation courante**

Étant donné le faible nombre de publications traitant de la mine Velardeña, l'interprétation courante provient surtout des géologues (Pinet, 1999) et des documents de la mine. Il n'y a aucune interprétation publiée des structures sur la propriété.

Il y a environ 30 Ma, le champ de contraintes tectoniques se modifia et un régime extensif caractérisé par des failles normales associées à une déformation de type "Basin and Range" a succédé à un régime compressif (McDowell et Clabaugh, 1979; Aguirre-Diaz et McDowell, 1993; Staude et Barton, 2001).

La tectonique post-laramienne est marquée par des failles normales ayant un rejet important, soit plus de 100 mètres, visible grâce au décalage des unités sédimentaires et des roches volcaniques felsiques tertiaires. Les failles sur le flanc Ouest de la Sierra de San Lorenzo sont de ce type. D'autres de ces failles sont localisées dans la Sierra de San Lorenzo même, entre autres sur la propriété de la mine.

L'interprétation des veines à l'ouest de la faille Buenaventura suggère que celles-ci représentent l'extension vers l'ouest des veines minées dans le mur de la faille, ces dernières représentant un niveau structural plus bas; i.e. la faille Buenaventura ayant

abaissé les veines, de façon à juxtaposer la partie sommital du système hydrothermal à l'ouest avec la zone minéralisée à l'est. Cette interprétation est basée sur: 1) l'hypothèse selon laquelle la faille Buenaventura correspond à la structure montrant le plus grand déplacement et 2) l'analyse de la veine Los Muertos, qui montre une section verticale plus complète du système hydrothermal (Pinet, 1999).

Selon cette interprétation, le rejet vertical de la faille Buenaventura serait de 260 mètres (Pinet, 1999). La veine Buenaventura 2 se corrèlerait avec la veine Buenaventura 3 et avec la veine Terneras, la veine Viborillas avec la veine San Juanes et la veine Ordenanza 1 avec la veine San Mateo (Pinet, 1999).

#### **2.4. Failles tardives**

Les failles tardives de la propriété ont été formées selon deux orientations: une orientation nord-sud dominée par les deux failles majeures, soit les failles Buenaventura et Ordenanza, et une orientation NW dominée par plusieurs failles subsidiaires qui sont recoupées par les failles majeures. Les deux systèmes de failles montrent des compositions, des textures et des structures similaires et sont contemporains d'une intense activité hydrothermale. À l'échelle de la Sierra de San Lorenzo, les failles NW deviennent parfois des failles majeures qui recourent les failles N-S (fig. 9). Ces deux orientations de failles recourent toutes les unités lithologiques et les veines minéralisées présentes sur la propriété de la mine Velardeña.

### **3. STRUCTURES ET MINÉRALISATIONS DU TOIT DE LA FAILLE BUENAVENTURA**

Les veines dans le toit de la faille Buenaventura possèdent des teneurs en métaux précieux et en métaux de base moins élevées que les veines du mur de la faille (tableau 2). Les descriptions qui suivent proviennent d'observations macroscopiques de terrain et d'échantillons, de même que d'observations microscopiques sur les lames minces d'échantillons choisis.

#### **3.1. Roches-hôtes**

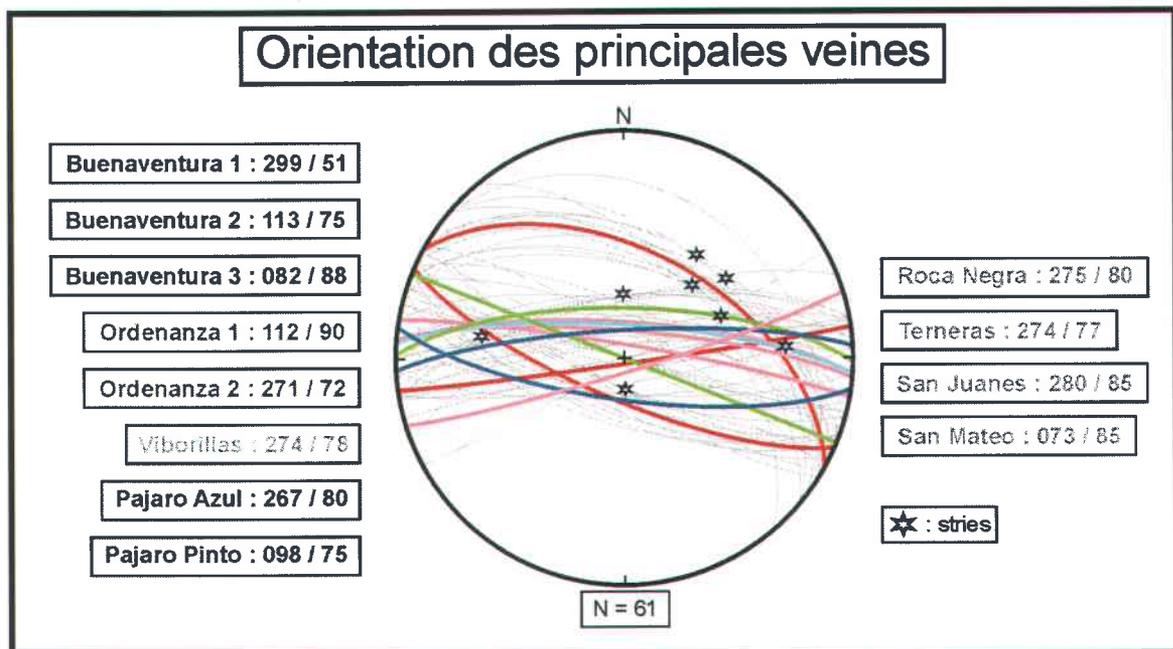
Les roches du toit de la faille Buenaventura sont les mêmes que les roches du mur de la faille; calcaires crétacés, intrusion tertiaire de Terneras et skarns. On retrouve des conglomérats et des rhyolites tertiaires dans le toit de la faille Ordenanza. La majorité des veines dans le toit de la faille Buenaventura se retrouvent dans les calcaires; il est donc important de noter que ces calcaires sont métamorphisés près de l'intrusion, où toutes les roches encaissantes sont skarnifiées.

#### **3.2. Structures-hôtes**

Les veines décrites ci-dessous affleurent dans la partie centrale de la zone cartographiée, entre les failles Buenaventura et Ordenanza, les deux failles majeures de la zone d'étude. Il s'agit des veines Buenaventura 1, Buenaventura 2 et Buenaventura 3 qui se trouvent dans la moitié nord de la carte, près de la route Terneras; Buenaventura 1 et 3 du côté nord, Buenaventura 2 du côté sud. Il y a aussi les veines Ordenanza 1 et Ordenanza 2, qui affleurent au bout de la route Ordenanza, dans la partie centrale ouest de la carte. Juste à l'est de ces dernières se trouve la veine Viborillas qui se situe entre la route Terneras et la route de la mine. Au sud de la route de la mine il y a aussi la veine Pajaro Azul. Finalement, environ 300 mètres au sud de cette dernière veine se trouve la veine Pajaro Pinto.

Les dimensions de la zone cartographiée sont d'environ 1.5 km X 1 km. Longitudinalement, cette zone commence environ 500 mètres à l'ouest de la faille Ordenanza (7,000E) et s'étend jusqu'à l'est de la faille Buenaventura (9,000E). La zone s'étend de la zone de Pajaro Pinto (4,300N) jusqu'au nord des veines Terneras et Buenaventura 1 (5,500N).

Les orientations et les pendages des veines du mur et du toit de la faille Buenaventura sont présentés sur la fig. 11.



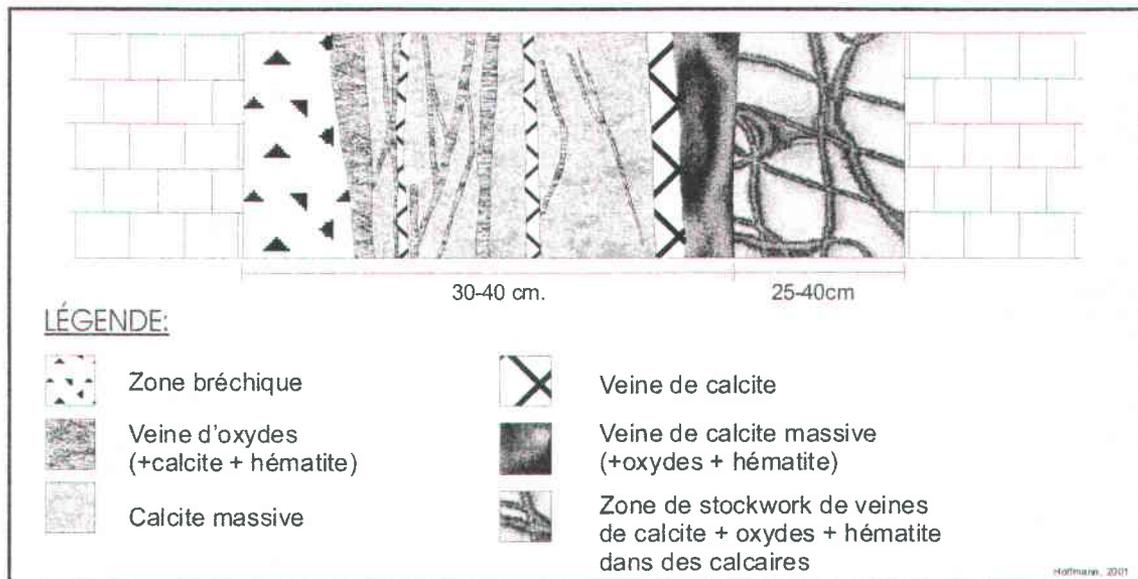
**Figure 11 : Orientations des veines du mur (à droite) et du toit (à gauche) de la faille Buenaventura (projection de Schmidt, hémisphère inférieur).**

### 3.2.a. Zone Buenaventura

Cette zone contient 3 veines : Buenaventura 1, 2 et 3. B1, B2 et B3 font partie du système est-ouest de veines. Quoique orienté N299, B1 est compris dans le système est-ouest.

La veine Buenaventura 1 se trouve au nord de la route Terneras (carte en appendice B). Elle est limitée à l'ouest par une faille subsidiaire et elle disparaît à l'est lorsqu'elle croise

la route Terneras; on ne la retrouve pas de l'autre côté du chemin. À l'arrêt EH-105 et environ 30 mètres dans chaque direction le long de la veine, des travaux antérieurs sur une extension verticale de 50 mètres sont visibles (arrêts EH-14, EH-97, EH-105, EH-116, voir la carte en appendice B). Il y a quelques excavations mineures sur la veine, plus au NW (arrêts EH-93 à EH-96, EH-115).



**Figure 12 : Coupe schématique de la veine Buenaventura 1.**

La veine Buenaventura 1 est continue et oxydée en surface sur plus de 450 mètres. Elle est incluse dans un encaissant de calcaires et de skarns (Appendice A, planche 5, photo A, B, D et E). Son orientation moyenne est de 299 / 51 et elle montre des stries de glissement ayant un angle de chute de 74° vers le NE qui témoignent d'un mouvement normal où le bloc nord descend. Des stries décrochantes ont été observées à une localité, où elles avaient un angle de chute de 15°. Avec une largeur qui varie entre 0.3 et 2 mètres, elle a retourné des valeurs (sur 89 analyses (données de BLM)) de 0.3 g/t Au et 136.6 g/t Ag sur une largeur moyenne de 1.07 mètres (tableau 2). Cette variation de largeur est due aux plans de stratification et à la perméabilité des calcaires. Sur 1 lame mince (provenant de l'affleurement EH-116), la veine contient des carbonates (70%), du quartz (20%), des oxydes (9%) et de la pyrite (1%). Un schéma de sa structure générale est présenté à la figure 12. Ce schéma montre que la veine est composée d'une partie bréchique, contenant des fragments de calcaire, suivi d'une zone à calcite massive recoupée par des veinules d'oxydes (+calcite, +hématite) et des

veinules de calcite, montrant des textures crustiformes et colloformes. Vient ensuite une zone de calcite massive, contenant des oxydes et de l'hématite, le tout bordé par une zone de stockwork de veinules de calcite dans les calcaires.

La veine Buenaventura 2 se trouve au sud de la route Terneras (carte en appendice B). Elle est limitée à l'ouest par une faille subsidiaire et elle disparaît à l'est lorsque, comme pour la veine Buenaventura 1, elle croise la route Terneras (EH-12). À l'endroit où elle rejoint la route Terneras, une galerie d'exploration ayant une hauteur maximale de 10 mètres suit la veine, sur une longueur d'environ 30 mètres (EH-12). Il y a quelques travaux en surface (EH-9, EH-10, EH-138).

Cette veine est visible en surface de façon discontinue sur plus de 330 mètres et sa largeur varie entre 0.1 et 0.43 mètres (Appendice A, planche 5, photo F). Elle a une orientation moyenne de 113 / 75 et 16 échantillons analysés ont retourné des valeurs de 1.4 g/t Au et 170.5 g/t Ag (tableau 2) (données BLM). Sur le terrain, cette veine contient des horizons de calcite avec géodes, des horizons bréchiques et des horizons avec un rubanement d'hématite. Dans la partie bréchique de la veine, on trouve des clastes de plagioclase (fragments de roches intrusives) et des clastes de carbonates pouvant atteindre 7 mm de diamètre. Dans 2 lames minces, on voit du quartz (10%), des carbonates (73%), des oxydes (15%), de la pyrite (2%) et un peu de barite (traces). On voit également des textures crustiformes, évidences d'épisodes de "crack and seal", qui témoignent de la variabilité des conditions de pression et température dans le système hydrothermal. Le tout est finalement recoupé par une veinule (perpendiculaire à B2) de calcite tardive, stérile.

La veine Buenaventura 3 est recoupé par la veine Buenaventura 1 et se trouve au nord et au sud de la route Terneras (carte en appendice B) qu'elle croise. Elle est limitée à l'ouest par une structure cassante (EH-114) et elle disparaît à l'est lorsqu'elle croise la route Terneras, après avoir été recoupée par la veine Buenaventura 1. À l'endroit où un petit chemin monte jusqu'à la veine Buenaventura 1, il y a un puit profond de 10 mètres (EH-143) et il y a quelques travaux en surface, sur une longueur d'environ 20 mètres (EH-117, EH-118)

Cette veine est discontinue en surface sur une distance d'environ 180 mètres avec une largeur qui varie entre 0,1 et 0,4 mètre. Son orientation moyenne est de 082 / 88. Elle se trouve dans un encaissant calcaire, près du contact calcaire-diorite et montre une texture légèrement bréchique avec de la calcite, de l'hématite, des oxydes de Mn et des oxydes (Appendice A, planche 5, photo C). Sur 6 échantillons, B3 retourne des valeurs de 1.7 g/t Au, 197.8 g/t Ag 0.04% Cu, 2.6% Pb et 0.7% Zn (tableau 2). L'étude de 2 lames minces indique que cette veine est composée de carbonates (60%), de quartz (15%), d'apatite (5%), de pyrite (traces), de tétrahédrite (2%) et d'oxydes (18%). La tétrahédrite remplace la pyrite et est par la suite oxydée. On voit également sur une des lames minces une partie de brèche hydrothermale contenant des fragments de sulfures, donc la calcite ici présente est tardive à la minéralisation.

### **3.2.b. Zone Ordenanza**

Cette zone comprend deux veines : Ordenanza 1 et Ordenanza 2. Elles font partie du système de veines est-ouest.

La veine Ordenanza 1 se trouve juste à l'est de la faille Ordenanza, à la fin de la route Ordenanza (carte en appendice B) qu'elle croise et à partir de laquelle on peut y avoir accès. Elle est limitée à l'ouest et à l'est par des failles subsidiaires. Au bout de la route, il y a le puit de la mine Ordenanza. Ce puit est profond de 150 mètres et donne accès à 5 niveaux minés de la veine. Il y a quelques travaux en surface, sur une longueur d'environ 50 mètres (EH-111, EH-112).

Cette veine est continue en surface sur 200 mètres avec une extension verticale minée de 120 mètres (de teneurs sub-économiques), un pendage sub-vertical et une orientation moyenne de 112-292. Des calcaires partiellement recristallisés forment l'encaissant. La minéralisation en surface consiste en des oxydes, avec la zone de transition vers des sulfures dans les niveaux plus profonds (Pinet, 1999) (Appendice A, planche 6, photo C). Sur une largeur moyenne de 0.37 mètres, on retrouve des teneurs moyennes de 1.0 g/t Au, 385.5 g/t Ag, 0.14% Cu, 9.9% Pb et de 0.32% Zn pour 59 échantillons (tableau 2) (données BLM). Sur le terrain, cette veine présente des zones massives de quartz, calcite, hématite, oxydes de fer et oxydes de manganèse et des zones de veines de calcite, le tout contenant de nombreuses géodes. Elle est bordée

sur son flanc sud par une zone de stockwork large de 0.4 mètre. Sur 2 lames minces, on voit du quartz et de la calcédoine (84%), des carbonates (10%), des oxydes (5%), de la galène (5%) et de la pyrite (1%). La pyrite est remplacée par la galène. Certains grains de quartz, entourés de carbonates, ont été fracturés et remobilisés dans ces carbonates.

La veine Ordenanza 2 se trouve juste à l'est de la faille Ordenanza, juste avant la fin de la route Ordenanza (carte en appendice B), 75 mètres au NE de la veine Ordenanza 1. Elle disparaît à l'ouest où elle croise la route Ordenanza et elle est limitée à l'est par une faille subsidiaire (EH-85). L'accès à cette veine se fait par une galerie d'exploration à partir de la route Terneras, 70 mètres au NE du puit Ordenanza (EH-121). Cette galerie est longue de 80 mètres et comprend une excavation haute de 10 mètres sur une longueur de 25 mètres.

Cette veine est continue sur une longueur d'au moins 200 mètres avec une largeur qui varie entre 0.15 à 0.5 mètre (largeur moyenne de 0.36 mètre) et une orientation moyenne de 271 / 72. Une analyse de 18 échantillons donne une teneur moyenne de 0.63 g/t Au et 58.5 g/t Ag (tableau 2) (données BLM). Elle se compose d'un assemblage de calcite, d'oxydes de fer, d'oxydes de manganèse et un peu d'hématite (Appendice A, planche 6, photo F), le tout associé à un stockwork de veines de calcite. De la malachite a été observée sur le terrain dans cette veine. Dû à la friabilité du matériel, aucun échantillon de cette veine n'a pu être récupéré pour en faire une lame mince.

La figure 13 provient d'un échantillon recueilli à partir d'une petite veine 200 m au sud des veines Ordenanza (EH-107). Cet échantillon est l'exemple le plus complet des différents faciès que l'on retrouve dans les veines de la propriété. Comme pour différentes veines de la zone d'étude, on y retrouve des zones de calcite massive, des zones d'oxydes laminé, massive ou bréchique, des géodes de calcite et des oxydes de Mn. Nous avons tenté de mettre une séquence chronologique aux faciès qui y sont visible, numéroté de 1 à 5. La séquence des événements proposée pour la veine d'où provient l'échantillon serait, en premier lieu, une bréchification de l'encaissant suivi par l'infiltration initiale des fluides (zone 1). Par la suite, l'apport continu de fluides (probablement avec le fractionnement de ceux-ci) a résulté dans la variabilité minéralogique que l'on observe dans les zones 2 à 4. La zone 2 se trouve de chaque

coté de la zone 1 et représente une zone cisailée, large de 5 - 10 cm, composée de calcite et d'hématite. La zone 3, large de 5-10 cm, contient de la calcite, des oxydes de fer et des laminations d'oxydes de manganèse. La zone 4, large de moins de 10 cm, est composée essentiellement d'oxydes bien lités avec quelques géodes de calcite. Finalement, la zone 5, aussi large de moins de 10 cm, est caractérisée par des zones de calcite stérile.

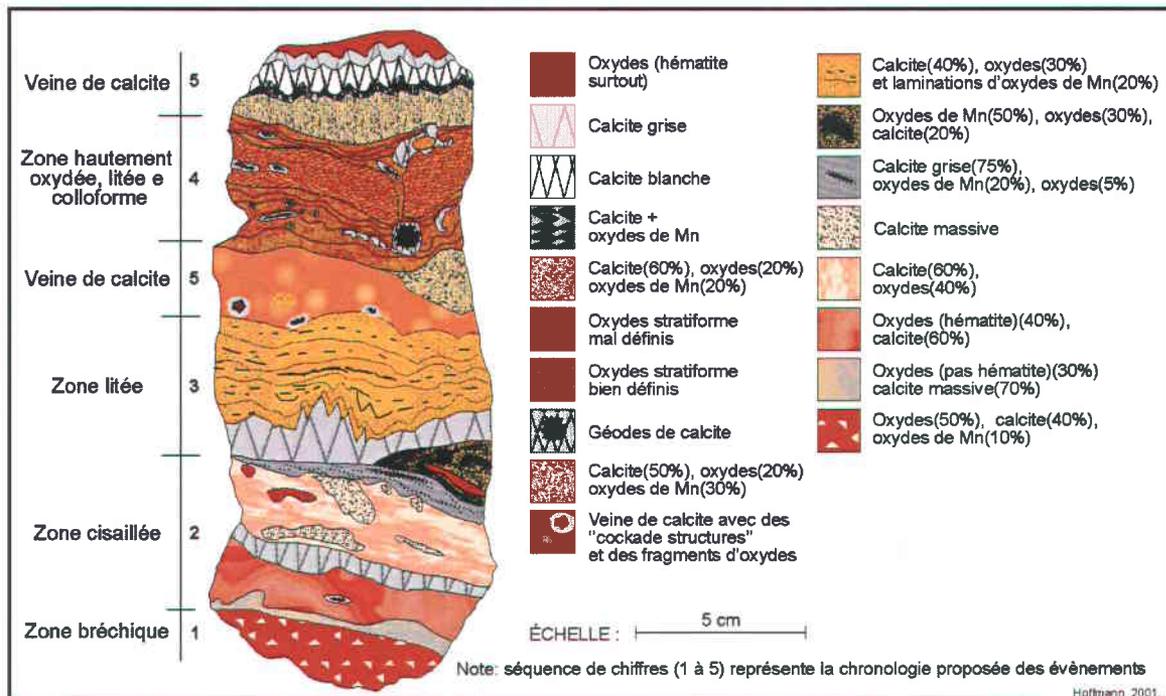


Figure 13: Coupe partielle de la séquence d'événements hydrothermaux dans les veines de la propriété de la mine Velardeña.

### 3.2.c. Zone Viborillas

Cette zone contient la veine Viborillas qui se trouve à mi-chemin entre les deux failles majeures, au sud de la route Terneras, et au nord de la route de la mine (carte en appendice B), au centre de la zone d'étude. Elle est limitée à l'ouest par une faille subsidiaire (EH-141, EH-142) et à l'est par la faille Buenaventura (EH-25). Des travaux ont été effectués sur un intervalle vertical d'environ 70 mètres à partir de la surface.

Cette veine fait partie du système est-ouest de veines. Elle est continue et oxydée en surface sur plus de 450 mètres. Elle a une orientation moyenne de 260 / 75, mais ses

différents segments ont des orientations qui varient entre 300 / 80 et 249 / 71 et des pendages qui varient entre 68° et 82°. Avec une largeur qui varie entre 0.2 et 0.4 mètre, la teneur moyenne pour 2 analyses est de 1.0 g/t Au et 265 g/t Ag (tableau 2) (données BLM). Cette veine est composée principalement d'une partie centrale bréchique de calcite massive avec quelques bandes d'oxydes et des épontes altérées (argilitisation ou séricitisation) (Appendice A, planche 6, photo A). L'étude de 2 lames minces indique que cette veine est composée de carbonates (30%), de quartz (45%), d'oxydes de Fe (hématite) et de Mn (25%), de pyrite (traces) et de chalcoppyrite (traces). La pyrite est presque entièrement oxydée. Sur le terrain, la malachite a été localement observée.

### 3.2.d. Zone Pajaro Azul

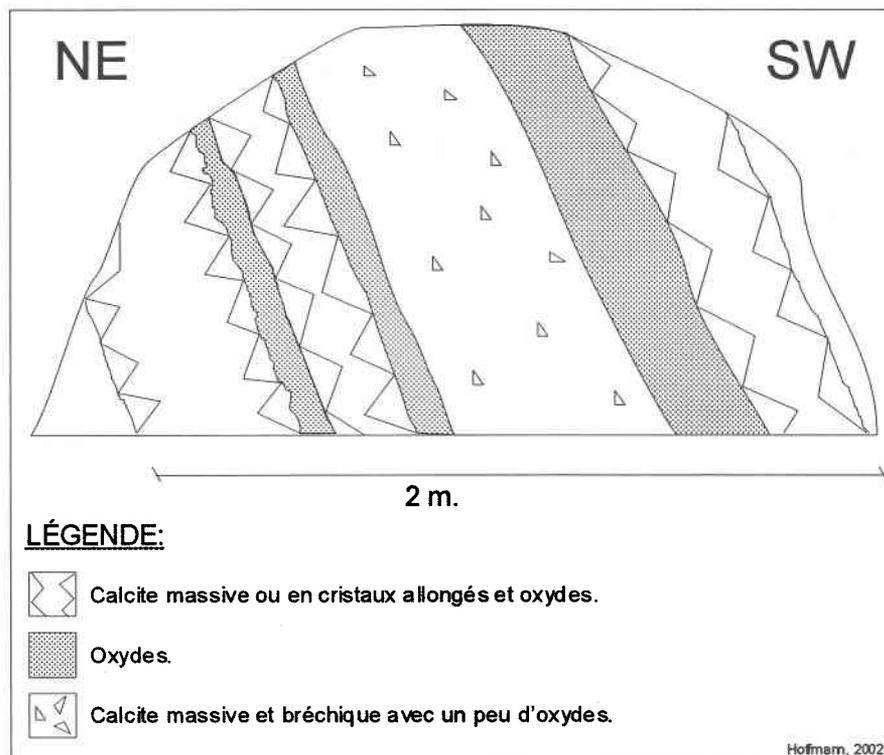
Cette zone contient les veines Pajaro Azul et Pajaro Pinto.

La veine Pajaro Azul (EH-150) se trouve à mi-chemin entre les veines Pajaro Pinto et Viborillas, au sud de la route de la mine (carte en appendice B). Elle est limitée à l'ouest et à l'est par des failles subsidiaires. Des travaux ont été effectués sur cette veine en surface (EH-150), à deux localités (2 tranchées de 5 mètres chacune) distant de 25 mètres.

Cartographiée sur plus de 300 mètres, cette veine possède une orientation de 267 / 80. Sa largeur varie entre 0,3 et 2 mètres et sa composition minéralogique comprend de l'hématite, des oxydes de manganèse, de la sphalérite, de la galène, de la pyrite, de la chalcoppyrite et de la malachite. La calcite et le quartz forment les minéraux de gangue, le quartz étant généralement associé aux teneurs élevées en métaux précieux (Pinet, 1999). L'encaissant correspond à des roches intrusives et des skarns. Un forage a intersecté la veine en profondeur, où sa largeur réelle est de 1.34 mètres, donnant des teneurs de 1.66 g/t Au et 36 g/t Ag (donnée de BLM).

La veine Pajaro Pinto se trouve au sud de la route de la mine (carte en appendice B). Elle est limitée à l'ouest et à l'est par des failles subsidiaires. Une galerie d'exploration (EH-22) longue de 80 mètres sans excavation verticale significative existe.

Cette veine est très continue en surface et a été cartographiée sur environ 400 mètres. La veine est large de 0.2 à 2 mètres dans un encaissant de roche intrusive skarnifiée, contenant beaucoup de grenats et également des taches d'oxydation, témoignant de la présence de sulfures dans les roches encaissantes. Avec une orientation moyenne de 098 / 75, elle montre un pendage vers le sud alors que le système de veines est-ouest possède généralement un pendage vers le nord. Sa minéralogie est constituée d'hématite, d'oxydes de manganèse, de galène, de sphalérite, de chalcopryrite et de pyrite dans une gangue de calcite et d'un peu de quartz. Des analyses sur 110 échantillons donnent des teneurs moyennes de 0.7 g/t Au et 77 g/t Ag (tableau 2) (données BLM), excluant deux analyses qui ont retournées des valeurs d'Ag au-dessus de 10,000 g/t Ag (données de BLM). L'argent est associé à des zones plus riches en galène.



**Figure 14: Coupe transversale de la veine Pajaro Pinto. (Prise de la galerie d'exploration à l'arrêt EH-22, vue vers l'extérieur.)**

On observe dans la coupe de la galerie d'exploration (fig. 14) la structure de la veine Pajaro Pinto. Sur la figure 14, on observe une zone bréchique large d'environ 60 centimètres à calcite massive avec un peu d'oxydes dans le centre de la veine Pajaro

Pinto. De part et d'autre de cette zone bréchique se trouvent des zones composées essentiellement d'oxydes (avec peu ou pas de calcite), large de 5 à 20 cm. On retrouve également des zones composées de calcite massive ou en cristaux allongés avec des quantités mineures d'oxydes. Ces zones sont larges de 20 à 50 cm.

### **3.2.e. Zone minéralisée dans les volcanites**

Cette zone contient les veines bréchiques que l'on retrouve dans les rhyolites, dans le toit de la faille Ordenanza (EH-131 à EH-133), entre la route de la mine et la route Ordenanza. Ces veines bréchiques possèdent une orientation moyenne de  $086 / 41^\circ$ , donc un pendage inférieur (moins de  $50^\circ$ ) à ce que l'on observe dans la majorité des veines étudiées et une orientation qui ressemble à celle du système de veines Temeras. Elles sont bréchiques, avec des fragments  $< 2$  centimètres, mais ne montrent pas la même minéralogie que les autres veines étudiées. Elles sont ici composées d'oxydes de fer, de calcite, d'oxydes de Mn et de peu d'hématite. La quantité de calcite est inférieure à ce que l'on observe pour les veines du toit de la faille Buenaventura. Les veines ici ne montrent pas de textures crustiformes-colloformes de la calcite, comme on le voit dans la veine Buenaventura 1 par exemple. La largeur des veines varie de 0.1 à 1 m. avec une largeur moyenne de 0.3 m. Les rhyolites sont antérieures à l'hydrothermalisme de la région.

Sur une lame mince, on voit de la calcédoine (50%), de la tétrahédrite (25%), des carbonates (15%), des oxydes (4%), de la sphalérite (3%), de la pyrite (2%), de l'arsénopyrite (1%) et de la chalcophanite (?). Une analyse en métaux donne des valeurs de 2.4 g/t Au, 14.5 g/t Ag, 1.6% Pb, 3.4% Zn et 0.02% Cu sur une largeur de 0.23 m (site EH-130). Cette concentration élevée en tétrahédrite n'est pas nécessairement représentative de cette zone.

### **3.3. Minéralogie et Paragenèse**

Des différents échantillons recueillis pour analyse, trente et une lames minces provenant des différentes veines et roches de la propriété de la mine Velardeña furent analysées pour une description minéragraphique.

L'importante circulation de fluides dans ces structures a entraîné la cristallisation de grandes quantités de carbonates et de quartz, qui sont visible dans plusieurs lames provenant des structures du toit de la faille Buenaventura. Ces carbonates contiennent parfois d'importantes quantités de fer. Tant qu'à lui, le quartz peut se trouver sous forme de calcédoine (un quartz de basse température, typiques des systèmes "low-sulfidation"), probablement dû à la variabilité dans les conditions de pression et de température lors de sa formation (Ramdohr, 1969). On retrouve également de la barite, de la prehnite, de la malachite, de l'azurite, de l'épidote, de l'actinote, de la chlorite et de l'anthophyllite.

Les sulfures sont présents dans toutes les veines majeures décrites plus haut (dans cette section, toutes les données de teneurs proviennent du tableau 2). Le sulfure qui prédomine est la pyrite, mais l'on retrouve également de la tétrahédrite, de l'arsénopyrite, de la galène, de la sphalérite, de la chalcopyrite, de la covellite et de la chalcocite. Il est important de remarquer cependant que les proportions relatives en ces différents minéraux varient d'une veine à l'autre, i.e. dans la veine Santa Juana, la quantité d'arsenic est de loin supérieur (4.41% As) à ce que l'on retrouve dans les autres veines (moyenne de 0.25% As); dans la veine San Juanes, la quantité de Cu est supérieur (2.83% Cu) et la quantité de Pb (0.5% Pb) et de Zn (0.5% Zn) inférieur à la moyenne des autres veines. Ces concentrations élevées en As et en Cu et faible en Pb et Zn expliquent en partie les teneurs en Au plus élevées (voir tableau 2). Il est à noter que dans la veine Terneras, nous avons observé de l'or natif.

La pyrite se trouve sous forme automorphe à hypidiomorphe avec des grains phanéritique et inégaux (0.5 à 5 mm de diamètre). Dans les veines Terneras, Ordenanza 1, Buenaventura 3 et San Juanes entre autres, on la retrouve sous forme de petits grains dans la tétrahédrite. Dans plusieurs veines, elle est partiellement (Appendice A, planche 7, photos A et B) ou complètement (Appendice A, planche 7, photo C) remplacée par la tétrahédrite, rarement par l'arsénopyrite. La pyrite est un des premiers sulfures à cristalliser dans la Sierra de San Lorenzo. Lorsque les veines se trouvent dans l'encaissant calcaire, la pyrite n'est que partiellement oxydé; la présence de carbonates dans la gangue rend la pyrite résistante à l'altération (Ramdohr, 1969). Elle montre des textures de remplacement des types cellulaire et "shredded".

L'arsénopyrite se retrouve sous forme automorphe et en losanges, avec des grains phanéritique et inégaux. Dans les veines bréchiques qui se trouvent dans les volcanites du toit de la faille Ordenanza, l'arsénopyrite est remplacé par la sphalérite. Dans la veine Santa Juana, elle remplace la pyrite. L'arsénopyrite s'est formé au début de la période minéralisatrice. Lorsqu'elle est présente, l'arsénopyrite est remplacé par la sphalérite et remplace la pyrite. L'arsénopyrite montre des textures de remplacement des types "shredded" et cellulaire.

La sphalérite se retrouve sous forme xénomorphe, avec des grains de taille inégale. Dans la veine Santa Juana, elle remplace la chalcoppyrite et rarement la tétrahédrite (seulement observé dans la veine Viborillas) (Appendice A, planche 8, photo D). La sphalérite a été formé vers le milieu de la période minéralisatrice. Elle montre des textures de remplacement de type "shredded".

La chalcoppyrite se retrouve sous forme hypidiomorphe et xénomorphe, avec des grains de taille inégale entre 0.05 et 3 mm de diamètre. Dans la veine San Juanes, la chalcoppyrite se trouve sous forme de petits grains au sein de la pyrite. Dans la veine Terneras, elle se trouve sous forme de petits grains dans la tétrahédrite. Dans la veine Santa Juana, la chalcoppyrite a cristallisé avant la galène et la tétrahédrite puisque ces derniers remplacent la chalcoppyrite. Elle s'est donc formée au début de la période minéralisatrice. Dans les fractures et en bordure des grains, la covellite remplace parfois la chalcoppyrite.

La galène se retrouve sous forme automorphe et fracturée, avec des grains phanéritique, aphanitique et inégaux. La galène remplace la pyrite et l'arsénopyrite (comme pour la sphalérite) et a donc probablement été formée de façon contemporaine à celle-ci. Il y a de l'argent à l'intérieur de la galène dans certaines des veines analysées à la microsonde (voir appendice C).

La tétrahédrite (Appendice A, planche 7, photo F) se retrouve sous forme hypidiomorphe à xénomorphe avec des grains aphanitique et inégaux. La tétrahédrite est un des derniers sulfures à cristalliser. Dans les veines Terneras, San Juanes et Santa Juana, la tétrahédrite remplace la pyrite et, à un moindre degré, la chalcoppyrite. Elle montre des textures de remplacement (fissuré et "cellular") et des textures d'émulsions. Elle se

trouve également en inclusions dans la galène. Elle comprend parfois des inclusions de calcédoine.

Nous n'avons trouvé qu'un grain d'or (Appendice A, planche 7, photo E). Celui-ci se trouve dans une lame mince provenant de la veine Temeras. Ce grain aphanitique (environ 0.1 mm. de diamètre) est entouré de fragments de tétrahédrite et de quartz (de taille similaire au grain d'Au), dans une matrice de cristaux de quartz beaucoup plus gros (1-5 mm. de diamètre). L'or provient donc probablement de la même période métallifère que la tétrahédrite, tel que l'affirme Spurr et Garrey (1908).

La covellite se retrouve sous forme de lattes hypidiomorphe à xénomorphe avec des grains inégaux. La covellite fut un des derniers sulfures à cristalliser. Dans certaines veines (San Juanes, San Mateo, Hiletas), la covellite remplace la chalcopryrite et la tétrahédrite (Appendice A, planche 8, photos A, B et C). Elle montre des textures squelettiques et fragmentées. La covellite se forme dans les fractures de la chalcopryrite et de la tétrahédrite.

Il y a au moins deux variétés de minéraux de silice; le quartz et la calcédoine. Le quartz dans ces veines se retrouve sous forme automorphe à xénomorphe, avec des grains aphanitique, équigranulaire. Le quartz s'est formé tout au long de la période minéralisatrice. Dans les veines Temeras, Ordenanza 1 et Viborillas, le quartz observé est zoné, et on retrouve des inclusions fluides primaires sur la limite de ces zones. Le quartz montre des textures colloforme, crustiforme et radiale autour des vides (des géodes) et des textures zonées et en éventail dans le grain même, avec une structure des cristaux en lattes radiale et en mosaïque par endroit.

La calcédoine se retrouve sous forme automorphe à xénomorphe, avec des grains variant de phanéritique fin à aphanitique et donc de tailles inégales. Comme pour le quartz, elle a cristallisé tout au long de la période minéralisatrice. La calcédoine se retrouve dans plusieurs des veines du mur et du toit de la faille Buenaventura. La calcédoine montre des textures de croissance primaire zonée, de même que des textures colloformes et crustiformes, radiales et en éventails.

Les carbonates (principalement de la calcite, mais également des carbonates de fer) dans ces veines se retrouvent sous forme automorphe et hypidiomorphe, avec des grains inégaux, avec des dimensions variant de 0.5mm à plus de 10 cm. Les carbonates ont aussi cristallisé tout au long de l'évènement hydrothermal, entre autre sous forme de calcite stérile tardive (veinules qui recoupe une veine mineure, à la même hauteur que le crayon, Appendice A, planche 6, photo E). On retrouve de nombreuses instances de remplissage de vide, visible entre autre par la présence de géodes de calcite (Appendice A, Planche 7, photo D). À l'intérieur d'une même veine, on retrouve des cristaux de calcite de petite et de grande taille, indiquant une variabilité dans la vitesse de cristallisation des minéraux dans les veines. Les carbonates montrent des textures de croissance primaire colloforme, crustiforme et zoné (Appendice A, planche 6, photo B). Pour former une texture colloforme et crustiforme, une sélection géométrique doit s'effectuer (Grigor'ev, 1961). La sélection géométrique est une sorte de rivalité pour l'espace entre les cristaux adjacents, laquelle résulte en une croissance de cristaux uniquement où le taux de croissance maximum est perpendiculaire à la surface de croissance, dans ce cas, la paroi de la veine. Cette direction de croissance coïncide avec la direction de contrainte minimale,  $\sigma_3$  (Henry et al., 1991).

La barite se retrouve sous forme automorphe. Elle est présente dans les veines Hiletas, San Mateo et Buenaventura 2, de même que dans la faille Buenaventura. La barite est en intercroissance avec des carbonates dans la faille Buenaventura.

Par analyse à la microsonde, nous avons déterminé que l'Ag se retrouve dans la galène et dans la tétrahédrite. La tétrahédrite est un porteur d'argent important dans ce type de gisement (Ramdohr, 1969). Les échantillons qui ont des teneurs élevés en argent (plus de 400 g/t Ag) contiennent de la tétrahédrite avec peu ou pas de galène. La concentration en tétrahédrite dans les lames analysées varie de 2% à 30%. Les échantillons qui montrent des teneurs plus faibles en Ag contiennent entre 10% et 35% de galène avec peu ou pas de tétrahédrite. La quantité total de galène argentifère dépasse de beaucoup la quantité total de tétrahédrite argentifère. Quoique la tétrahédrite semble contenir des concentrations plus élevées d'argent (l'analyse microsonde a révélé des concentrations atteignant jusqu'à 17,018 ppm dans un échantillon de la veine San Jaunes (appendice C)), c'est la galène qui représente le principale sulfure argentifère, comme c'est le cas à la mine Santa Maria (Gilmer et al.,

1988). Les analyses à la microsonde montrent des concentrations d'Ag dans la galène qui varient entre 1502 et 4348 ppm dans la veine Santa Juana.

En considérant que les veines de la propriété appartiennent toutes à un même système, les relations texturales observées entre les différents sulfures parmi ces veines sont les suivantes :

- La chalcoppyrite ne remplace aucun sulfure, mais se trouve sous forme de petits grains dans la pyrite et la tétrahédrite.
- La pyrite remplace parfois la chalcoppyrite.
- L'arsénopyrite remplace la pyrite.
- La sphalérite remplace l'arsénopyrite.
- La galène remplace la pyrite et l'arsénopyrite.
- La tétrahédrite remplace la pyrite et la chalcoppyrite.
- La covellite remplace la chalcoppyrite et la tétrahédrite.

Nous avons déterminé une paragenèse minéralogique en 5 étapes successives :

1. chalcoppyrite + pyrite + arsénopyrite + quartz + calcite →
2. sphalérite + galène + →
3. tétrahédrite + or + covellite + quartz →
4. carbonates de Fe + calcite →
5. calcite

La première étape correspond à la période cuprifère de l'hydrothermalisme dans la Sierra de San Lorenzo, la seconde à la période argentifère + (Pb et Zn), et la troisième à la période aurifère et la continuité de la période argentifère.

## **4. STRUCTURES POST-MINÉRALISATION**

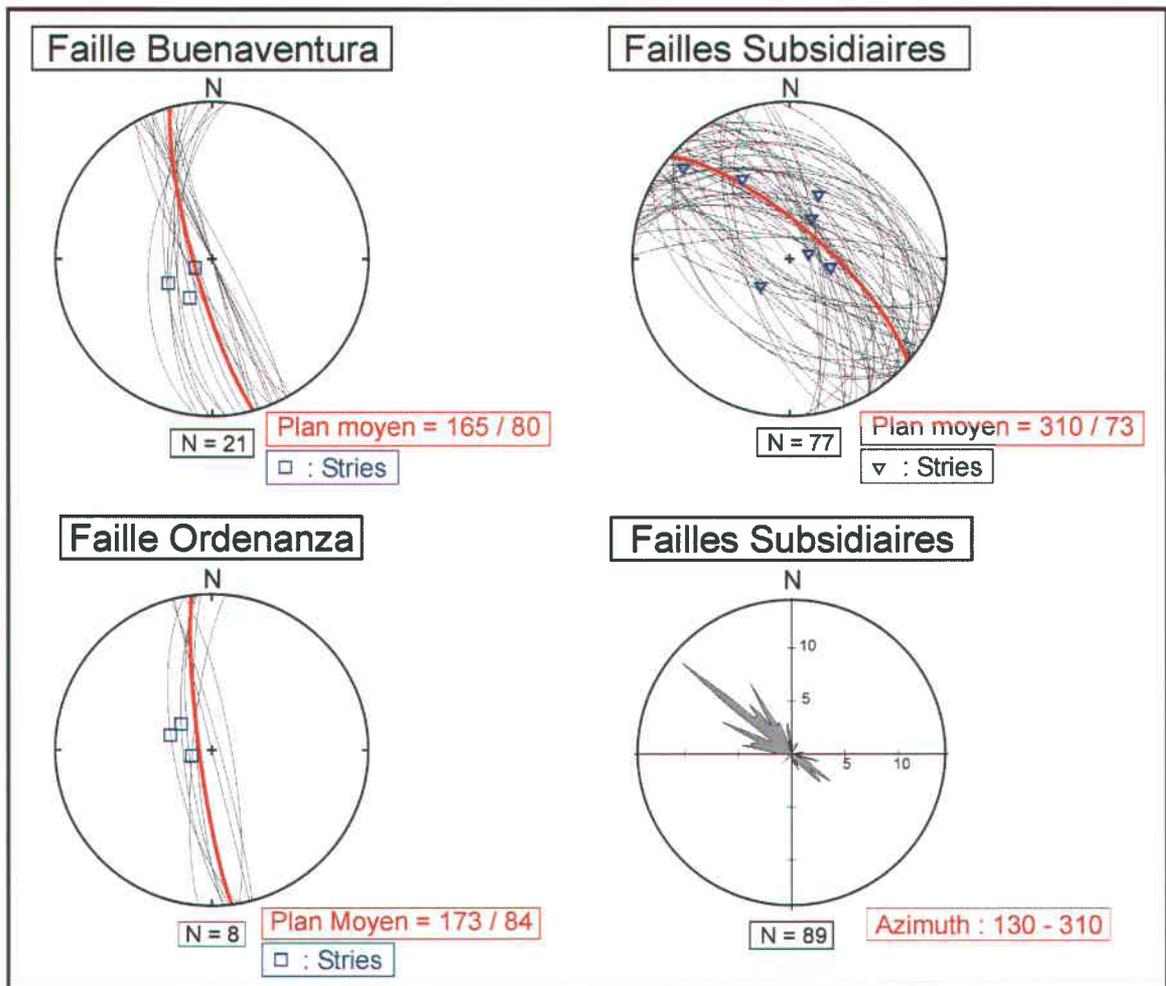
### **4.1. Les failles majeures**

Les veines minéralisées sont recoupées par une série de failles tardives contemporaines d'une intense activité hydrothermale. Les principales structures sont les failles Buenaventura à l'est (Appendice A, planche 1, photos a, b) et Ordenanza à l'ouest (Appendice A, planche 2, photos b, c). Ces failles représentent, respectivement, la troncature est des veines Buenaventura et Viborillas et la troncature ouest des veines Ordenanza. Ces failles majeures sont orientées N - S à NNW - SSE, et les pendages sont abrupts vers l'ouest (fig. 13). Ces failles montrent des mouvements normaux vers l'ouest.

Chacune de ces failles est soulignée par un corridor de déformation fragile et d'altération hydrothermale atteignant jusqu'à 30 mètres d'épaisseur. Au sein de ces corridors de déformation, les roches encaissantes sont fortement carbonatisées et hématisées. Les brèches hydrothermales sont abondantes et les textures/structures exposées suggèrent une succession incrémentale et complexe d'altération et de bréchification des roches encaissantes et de précipitation de calcite et d'hématite.

#### **4.1.a. Faille Buenaventura**

Cette faille bréchique, d'orientation 165 / 80 (fig. 15), marque la limite ouest du gisement de la mine Velardeña. Elle affleure sur toute la longueur que nous avons cartographiée, soit de la limite nord de la carte, jusqu'à la route de la mine, où elle disparaît; nous avons extrapolé son extension vers le sud au delà de ce point. Elle affleure particulièrement bien de chaque côté de la route Terneras (Appendice A, planche 1 photos A et B) où elle est composée majoritairement d'hématite et de calcite. Les unités lithologiques ont subi un déplacement latéral d'environ 150 m. La faille est également visible sous terre, dans la galerie d'exploration principale de la mine, où elle est large d'environ 28 mètres.



**Figure 15 : Orientations des failles majeures et subsidiaires (projection de Schmidt, hémisphère inférieur)**

La faille Buenaventura correspond à une zone de déformation large de 5 à 40 mètres contenant principalement de l'hématite (en laminations), de la calcite, des oxydes de fer et de l'oxyde de manganèse (sous forme massive et en laminations), avec accessoirement de la barite et des sulfures. On observe des fragments sub-angulaires, millimétrique à décimétrique, de calcite et de calcaire. Plusieurs de ces fragments de calcaire sont recoupés par des veinules de calcite (Appendice A, planche 1, photo c). On retrouve également des géodes de calcite, millimétrique à centimétrique.

Dans l'intrusion, la nature de la faille change. Dans la galerie d'exploration principale (qui donne accès à la mine) la faille Buenaventura contient moins de calcite que dans

les calcaires et comporte de nombreux plans de failles (inaccessible à l'observation détaillée).

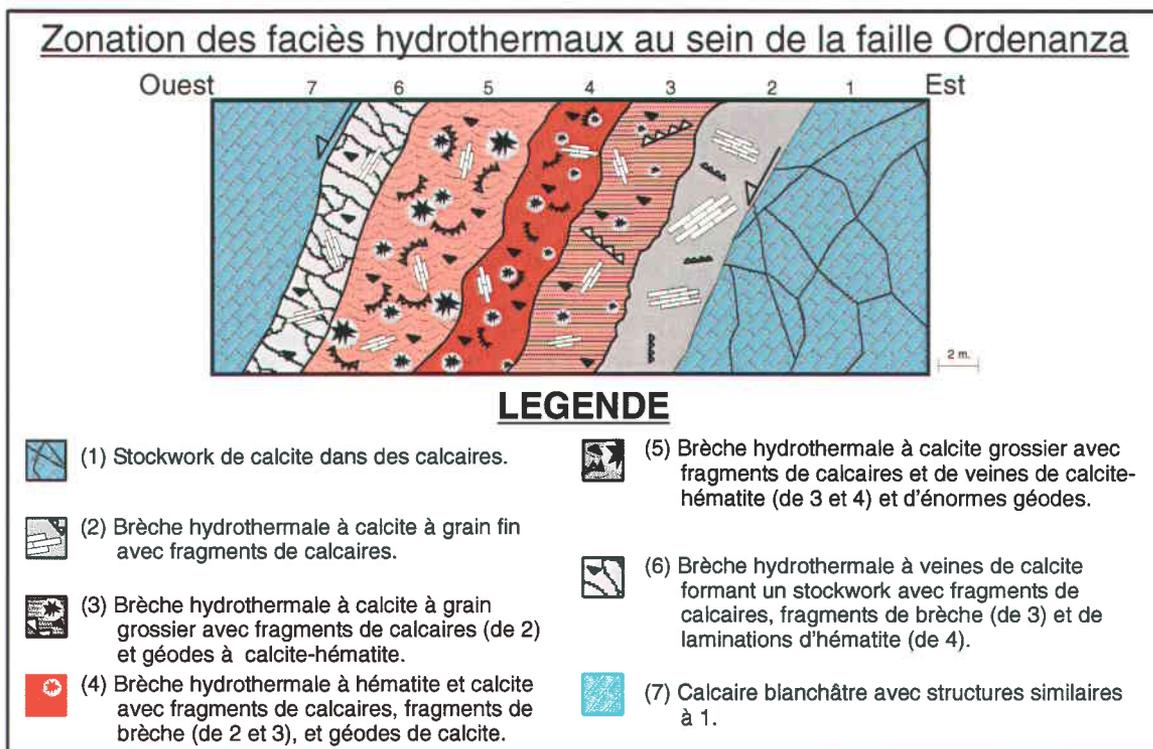
Sur la faille Buenaventura, les seuls indicateurs cinématiques présent sont des stries (avec des « steps » sur les plans de failles) que l'on retrouve sous forme de rainures. Ces rainures sont généralement à forte plongée vers le sud, i.e.  $60^\circ$  à  $80^\circ$ . N'étant recoupée par aucune autre structure, cette faille est, avec la faille Ordenanza, la structure cassante la plus jeune dans la zone d'étude.

#### **4.1.b. Faille Ordenanza**

La faille Ordenanza, plus à l'ouest, est d'une largeur comparable à la faille Buenaventura, soit environ 30 mètres, et d'orientation presque identique nord-sud à pendage ouest (fig.15). Elle marque la limite Est des rhyolites (daté à Nazas à 30 Ma (Aguire-Diaz & McDowell, 1993)) qui ne sont visibles que dans son toit et elle marque la limite Ouest des veines minéralisées de la propriété, exception faite de quelques petites structures minéralisées que l'on trouve dans les rhyolites, dans la partie SW de la carte en appendice B (i.e. arrêt EH-130). Elle affleure de la route Terneras à la route de la mine, mais elle est particulièrement bien exposée sur la route Ordenanza de même que sur une des pistes qui croisent toute la propriété (ligne pointillée double, carte en appendice B), près du contact de la faille avec les calcaires du côté est et avec les rhyolites du côté ouest, dans la partie SW de la carte (EH-134). L'épaisseur de la couche de roches rhyolitiques dans le toit de la faille, vue de la route de la mine, est d'environ 200 mètres; dans le mur, on ne voit que des calcaires. Ceci représente donc une valeur de rejet minimal pour la faille Ordenanza.

Comme la faille Ordenanza est bien exposée en surface, on peut mieux voir l'hydrothermalisme caractérisant les failles majeures. Il y a des bandes épaisses (1 à 3 mètres) de calcite et hématite laminées, avec des textures crustiformes et colloformes évidentes. Il y a également des textures crustiformes, colloformes, cocardes et radiales dans la calcite présente dans la faille. Les stries de glissement sont à forte plongée vers le nord; i.e.  $75^\circ$ .

La faille Ordenanza contient des fragments de calcaire. Ces fragments sont sub-angulaires, d'ordre centimétrique à décimétrique, et sont recoupés par des veinules de calcite, provenant probablement de la zone à stockwork du côté est de la faille (fig. 16).



**Figure 16 : Coupe schématique de la faille Ordenanza**

Il y a une nette zonation des faciès hydrothermaux et bréchiques visibles au sein de la faille Ordenanza, tel que décrit dans la figure 16 et illustrée dans les planches 3 et 4 de l'appendice A. Cette coupe, large d'environ 20 mètres, provient d'un transect effectué sur cette faille, à partir de l'arrêt EH-134, en traversant la faille vers le SW. Elle montre, d'est en ouest, un encaissant calcaire recoupé par une zone de stockwork (zone 1) puis une première zone de brèche hydrothermale (zone 2) à calcite à grain fin avec fragments de calcaires, centimétrique à décimétrique. Cette zone bréchiue représente la limite est de la faille. Suit la zone 3, une zone bréchiue à calcite grossière, contenant des fragments de calcaires (centimétrique à décimétrique) provenant de la zone 2 ainsi que des géodes à calcite avec un peu d'hématite. La zone 4 est une zone bréchiue à hématite et calcite, avec des fragments de calcaires (centimétrique à décimétrique), des fragments de brèche des zones 2 et 3 (centimétrique à décimétrique) ainsi que des géodes de calcite (centimétrique à décimétrique). Dans cette zone, la

quantité d'hématite dépasse la quantité de calcite; cette zone est presque entièrement rouge vue macroscopiquement. La zone 5 est une zone de brèche hydrothermale avec de la calcite à grain grossier contenant des fragments de calcaires et de veines à calcite-hématite provenant des zones 3 et 4. Cette zone contient également d'énormes fragments de géodes, avec un diamètre allant jusqu'à 1 mètre et des cristaux long de 1 à 10 cm. La zone 6 est une autre zone de brèche hydrothermale contenant des fragments de calcaires et des fragments de brèches provenant des zones 3 et 4, le tout entouré d'un stockwork de veines de calcite. La zone 7 est une zone de stockwork de calcite qui recoupe l'encaissant calcaire.

Le grand volume de fluides que l'on retrouve dans les failles majeures et la suite de faciès hydrothermaux qui caractérisent la faille Ordenanza et qui incorporent successivement des fragments d'épisodes de bréchification antérieure sont interprétée comme résultant d'une déformation incrémentale en conditions de sursaturation en fluides.

La faille Buenaventura ne montre pas une succession de faciès bréchiques tel qu'on le voit dans la faille Ordenanza. On voit plutôt la même structure sur toute sa largeur, i.e. une matrice composée principalement d'hématite, de calcite, d'oxydes de manganèse avec des fragments centimétrique à décimétrique de calcaire et de veines de calcite. Cependant, il est important de noter qu'elle ne recoupe pas les mêmes roches que la faille Ordenanza; une grande section de la faille Buenaventura recoupe l'intrusion de Terneras, donc la compétence des roches n'est pas la même que pour la faille Ordenanza (qui recoupe principalement les calcaires), d'où une expression structurale différente.

#### **4.2. Les failles subsidiaires**

Entre les failles Buenaventura et Ordenanza, on retrouve une série de failles subsidiaires qui sont aussi soulignées par une intense bréchification hydrothermale (Appendice A, planche 2, photos D et E). Les volumes de roches affectées sont cependant moins importants. Ces failles subsidiaires sont orientées principalement NW-SE à pendage NE et certaines traversent complètement le secteur cartographié (fig. 15).

La majorité des stries de glissement sont "downdip" et montre des "steps" (Appendice A, planche 1, photo D); ceci indique la prédominance de mouvements normaux. Les failles subsidiaires tronquent nettement les veines Buenaventura 1, 2 et 3, Viborillas et Ordenanza 1 et 2.

Ces failles sont composées, comme pour les failles majeures, de calcite, d'hématite, d'oxydes de Mn et de quartz. Vu leur similarité minéralogique, autant compositionnelle que structurale (présence de calcite crustiforme – colloforme avec des baguettes (bladed calcite) longues jusqu'à 15 cm.), ces failles sont considérées comme étant génétiquement associées aux failles majeures. Ceci est confirmé à l'échelle du district, tel que schématisé dans la carte à la figure 9.

Il est à noter qu'à une localité (EH-149), près de la limite est de la veine Pajaro Azul, on retrouve de la malachite disséminée dans une de ces failles, dans le cœur de la structure.

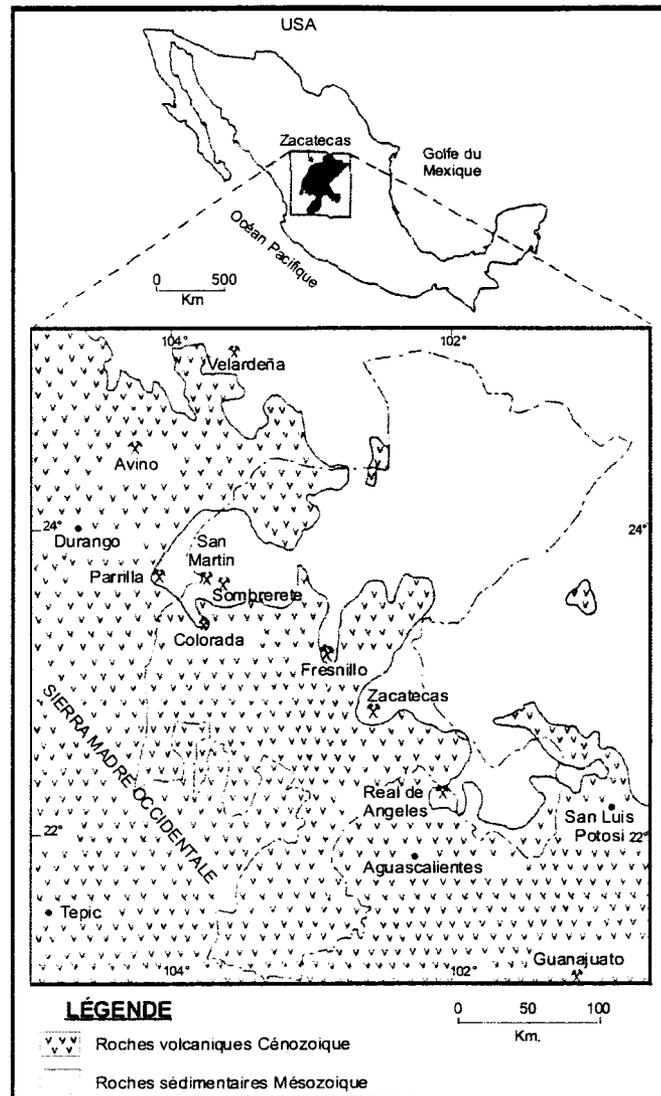
### **4.3. Interprétation cinématique et géométrique**

#### **4.3.a. Arguments régionaux**

L'interprétation cinématique et géométrique du tectonisme ayant affectée les régions avoisinantes à Velardeña, telles que les régions de Nazas, de Fresnillo, de Zacatecas, de Guanajuato, de Tayoltita, de Santa Barbara et de La Colorada (fig. 17), a permis de mieux comprendre la suite d'événements ayant affecté la région cartographiée. Malgré l'étendue de la province du "Basin and Range" sud, il n'y a que quelques brèves descriptions sur les failles normales et le magmatisme associé (Henry & Aranda-Gomez, 1992; Aguirre-Diaz et McDowell, 1993). Nous avons tout de même tenu compte de l'histoire tectonique régionale du "Basin and Range" sud de façon à mieux comprendre et interpréter l'ensemble des failles qui se trouvent sur le terrain d'étude.

Pour contraindre l'âge du tectonisme ayant affecté la région, il faut se baser sur des arguments volcaniques et hydrothermaux. Le groupe volcanique supérieur, tel que décrit à la section 1.1.a, inclut les rhyolites qui se trouvent dans la zone d'étude et dans

la Sierra de Santa Maria. Les données géochronologiques obtenues pour la Sierra de Santa Maria montrent que l'essentiel de la mise en place de ce groupe volcanique s'est effectué durant une période assez courte, à l'Oligocène (34-29 Ma) (Gilmer et al., 1988).



**Figure 17: Localisation de certains districts miniers dans le centre du Mexique.**

Les failles présentes sur la propriété de la mine recoupent toutes les unités lithologiques et toutes les veines minéralisées et stériles. Les fluides minéralisateurs qui ont formé les veines proviennent probablement de la même source que ceux qui ont formés les veines minéralisées de la Sierra de Santa Maria, les deux Sierras n'étant séparées que de 3 km et montrant des compositions minéralogiques similaires. Les veines

minéralisées dans deux des zones à sulfures dans la Sierra de Santa Maria furent datées à  $31 \pm 2$  Ma (Gilmer et Harder, 1987).

Les failles majeures et subsidiaires ne sont donc pas plus vieilles que  $31 \pm 2$  Ma. La plupart des régions avoisinantes montrent un âge de la minéralisation semblable (tableau 3) (Knowling, 1976; Maldonado-Espinosa and Megaw, 1983; Grant and Ruiz, 1988; Lang et al., 1988; Henry et al., 1991 et McKee et al., 1992) (voir 5.2).

<i>Localité</i>	<i>Orientation de veines</i>	<i>Âge de la minéralisation (Ma)</i>	<i>Age du tectonisme associé (Ma)</i>	<i>Hydro-thermalisme suit activité volcanique par (Ma)</i>	<i>Auteurs</i>
Fresnillo	N10°-45°W	28 - 32	31	1 - 2	Lang et al., 1988
Pachuca Real del Monte	N 0°-75°W	20 - 21	> 23.7	0.5 - 2	McKee et al., 1992
Guanajuato	N35°W	27 - 29	32-28	0.5 - 2	McKee et al., 1992
Ocampo, Chihuahua	N30°W		29-28		Knowling, 1976
San Carlos, Chihuahua	N27°W		31		Henry et al., 1991
Santa Eulalia, Chihuahua	N10°W		27		Maldonado-Espinosa and Megaw, 1983
Santa Barbara, Chihuahua	N10°W	26 - 28 et 32	32-28		Grant and Ruiz, 1988

**Tableau 3: Âge de la minéralisation et du tectonisme associé pour certains gisements épithermaux dans divers districts du Mexique.**

D'autres arguments d'ordre volcanique peuvent être présentés à partir d'études effectuées dans la région de Nazas, localisée à 75 Km à l'WNW de Velardeña. Dans cette région, on trouve un groupe de failles normales (orientées N20°-70°W) à fort pendage, généralement vers l'ouest avec des stries fortement plongeantes, qui recoupent une partie de la séquence volcanique du milieu Tertiaire (Aguirre-Díaz et McDowell, 1993). Le rejet sur ces failles varie entre 40 m et 300 m, des valeurs similaires aux structures que l'on a cartographié dans la zone d'étude à Velardeña

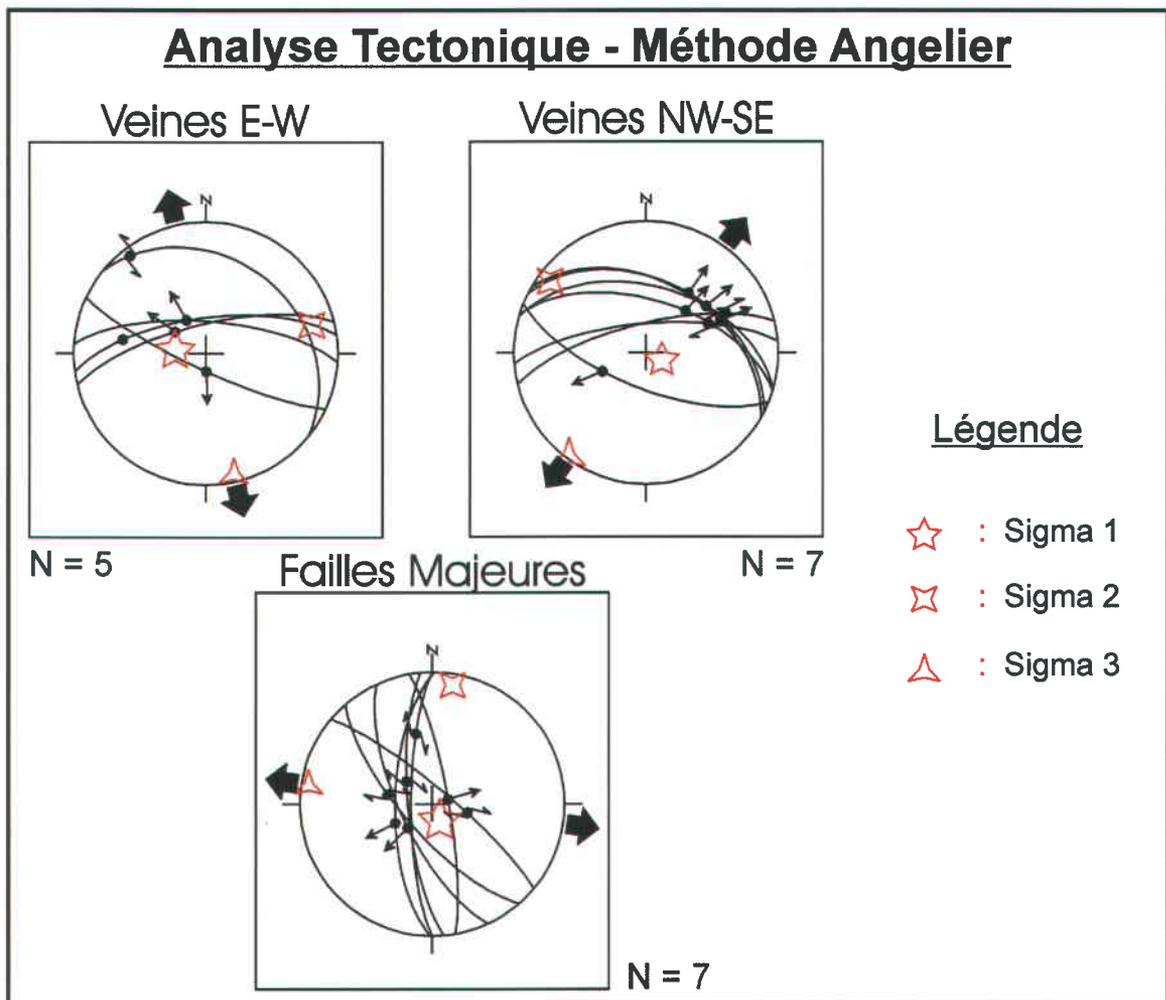
(d'après l'interprétation antérieure, section 2.3). La formation des failles à Nazas a eu lieu entre  $29.5 \pm 0.6$  et  $29.9 \pm 1.6$  Ma (Aguirre-Diaz et McDowell, 1993). La 1<sup>ère</sup> date marque la formation du tuf de Santa Clara qui n'a pas été déformé par les failles et la 2<sup>ème</sup> date correspond à la formation du tuf de Cerro Prieto qui a été faillé et basculé. Donc, l'estimation la plus précise pour la formation des failles de cette région est de  $29.7 \pm 1.6 - 0.6$  Ma. Étant donné la proximité de Nazas à Velardeña et la similitude des structures de ces deux régions, il est raisonnable de présumer que la formation des failles à Velardeña s'est produite lors du même épisode tectonique, soit l'extension NE - SW du "Basin and Range" sud du milieu Tertiaire. La datation isotopique effectuée sur des systèmes de veines orientés NNW dans d'autres districts miniers du nord du Mexique donne des âges similaires (Tableau 3).

#### **4.3.b. Arguments locaux**

Dû à la similitude dans la composition minéralogique des fluides ayant circulés dans les failles avec celle des fluides ayant formé les veines (voir 5.2) de même que les similitudes de textures minéralogiques (textures crustiformes / colloformes), il est proposé que la formation des veines et des failles est péné-contemporaine et provient d'un événement hydrothermal, unique et incrémental. De plus, les cristaux allongés de calcite dans les veines, formées par remplissage de vides, se forment dans la direction de la contrainte minimale d'un régime en extension (Henry et al., 1991). Les veines et les failles subsidiaires à Velardeña orientées NW - SE (comme plusieurs autres districts de veines épithermales au Mexique datés aux alentours de 30 Ma (tableau 3)), montrent une telle structure dans les cristaux de calcite (EH-29). Or, à la suite de l'orogénèse laramienne, le "Basin and Range" sud a subi une période d'extension NE - SW au plus tard vers 30 Ma (Stewart, 1978; Chamberlin, 1983; Aldrich et al., 1986; Henry, 1989; Henry et al., 1991; Henry et Aranda-Gomez, 1992; Aguirre-Diaz et McDowell, 1993).

Nous avons ensuite utilisé la méthode Angelier pour obtenir des tenseurs de contraintes (fig. 18). Nous avons d'abord fait le tri des données structurales afin de ne traiter que celles qui possèdent des stries de glissement (rainures) avec des « steps » sur les plans de veines ou de failles. Nous avons ensuite effectué l'analyse des paléocontraintes tectoniques par la méthode numérique inverse (Angelier, 1984, 1989), méthode basée sur le principe de minimisation des écarts angulaires entre la strie mesurée et la strie

calculée, afin de résoudre de façon analytique un tenseur moyen de contraintes. Les orientations presque perpendiculaires qui caractérisent les veines minéralisées par rapport aux failles posent cependant un problème d'interprétation. Sur la carte géologique en appendice B, on note que les failles majeures et les veines minéralisées forment un angle d'environ  $75^\circ$ . Il est, à priori, difficile de générer cette géométrie lors d'un événement tectonique unique sans faire varier l'orientation des contraintes principales. Les stries de glissement (figures 11 et 15) suggèrent qu'il faudrait une rotation des contraintes de près de  $90^\circ$  pour générer une telle géométrie.



**Figure 18: Analyse tectonique des contraintes en utilisant la méthode Angelier.**

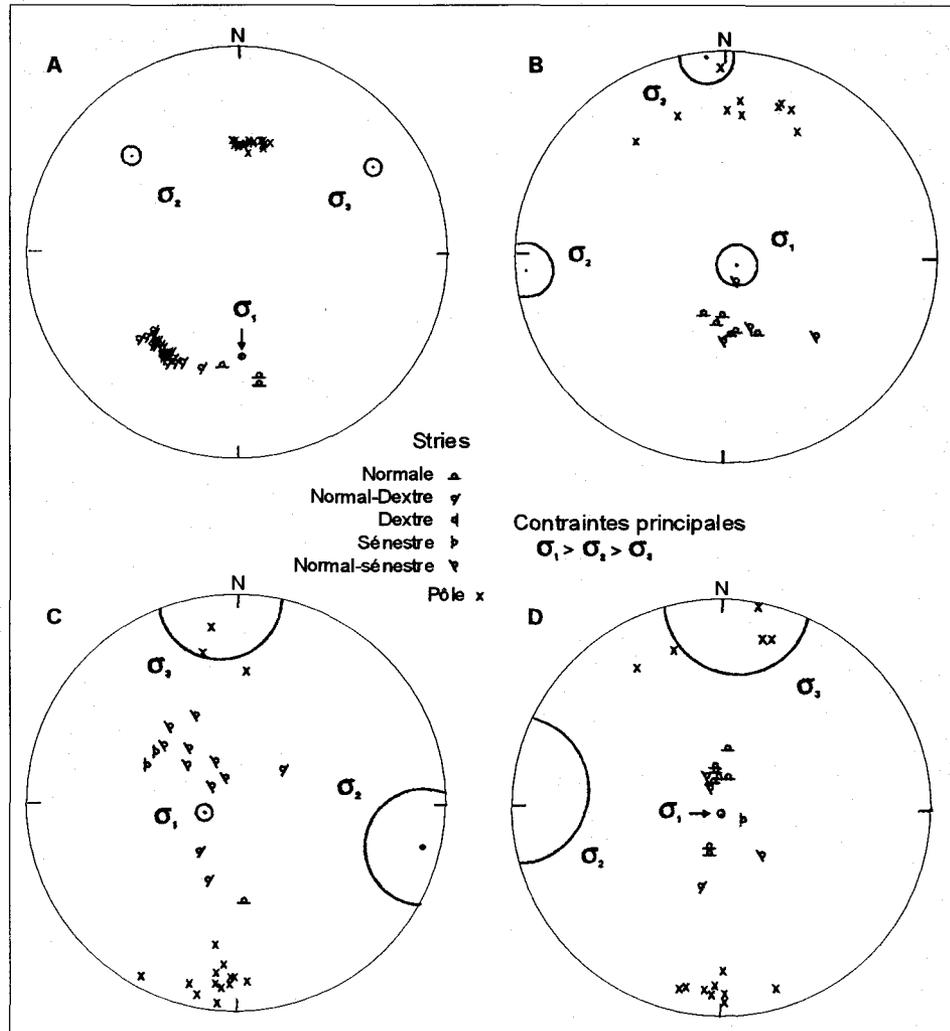
Examinons maintenant les trois schémas de la figure 18. Il y a trois familles de données : une famille pour les veines est-ouest (qui inclus entre autre la veine

Buenaventura 3 qui est recoupé par Buenaventura 1), une famille pour les veines NW - SE, qui incluent les failles subsidiaires et une famille pour les failles majeures. Pour les veines est-ouest, la direction moyenne d'extension est NNW-SSE. La période d'extension responsable de la formation de ces veines était caractérisée par une contrainte  $\sigma_1$  sub-verticale et de contraintes  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$  sub-horizontales. Pour les veines NW - SE, on note une extension typique du "Basin and Range" de l'époque, soit une extension NE - SW, avec  $\sigma_1$  sub-verticale et  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$  sub-horizontales. Cependant, vu que cette méthode fonctionne mieux lorsqu'on utilise des plans d'orientations variées (ce qui permet de définir plus précisément les axes de contraintes), ces deux schémas sont conciliables en un seul qui nous donnerait une direction d'extension NNE-SSW. Finalement, pour les failles majeures, la direction d'extension ( $\sigma_3$ ) a subi une rotation horaire d'environ  $40^\circ$  par rapport aux veines NW-SE et est maintenant ENE - WSW. Plusieurs hypothèses peuvent être proposées pour expliquer la rotation de  $90^\circ$  de la contrainte principale  $\sigma_3$  entre les veines E-W et les failles majeures.

1) La première hypothèse s'appuie sur un modèle proposé par Suter et al. (1995) pour la géométrie des failles présentes aux alentours du demi-graben d'Aljibes, 140 km au NNW de la ville de Mexico. Ce demi-graben est situé dans la ceinture volcanique Trans-Mexicaine, près de la limite entre cette province tectono-stratigraphique et celle du "Basin and Range" sud. Il est constitué de 5 failles est-ouest à pendage sud, avec un rejet vertical total de 480 m. et un rejet horizontal de 270 m. Ces failles sont recoupées par 2 failles normales nord-sud provenant du même régime tectonique que celui ayant engendré le "Basin and Range" sud au Miocène (Suter et al., 1995). Ces deux systèmes de failles ont été formés péné-contemporainement.

L'explication avancée par Suter et al. (1995) est une migration horizontale de la frontière entre les provinces volcaniques de la Sierra Madre Occidentale et de la ceinture volcanique Trans-Mexicaine, avec permutation intermittente entre  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$  (fig. 19). Pour obtenir de telles permutations, les valeurs de  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$  doivent être similaires. Les auteurs ont confirmé ceci en calculant le ratio de stress, c'est-à-dire  $\Phi$ , où  $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ . Toutes les valeurs de  $\Phi$  calculées sont inférieures à 0.2, ce qui indique que  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$  sont presque identiques. Des variations de magnitude de  $\sigma_2$  et de  $\sigma_3$  ont donc pu engendrer la permutation de ces deux contraintes, alors que la direction de contrainte principale maximale ( $\sigma_1$ ) est demeurée constante. À Velardeña, il est probable qu'au

niveau crustal que représentent les failles (premiers kilomètres de la croûte), le ratio de stress ait effectivement été faible.



**Figure 19: Projection des contraintes principales sur 4 failles dans le demi-graben d'Aljibes. La faille A est une faille à faible pendage, ce qui explique la déviation de  $\sigma_1$  de la verticale et de  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$  de l'horizontale (modifié de Suter et al., 1995).**

2) La seconde hypothèse serait que la permutation de  $\sigma_2$  et de  $\sigma_3$  fut causée par une importante augmentation de l'apport de fluides entre la formation des veines minéralisées et la formation des failles tardives ou la mise en place de l'intrusion. Cette hypothèse est d'ailleurs appuyée par les observations de terrain, i.e. il y a un volume beaucoup plus important de fluides dans les failles que dans les veines.

La cause de cette augmentation dans l'apport de fluides pourrait être reliée à une augmentation de l'activité magmatique régionale (i.e. mise en place tardive du pluton de Copper Queen par exemple), entraînant conséquemment un gradient thermique plus élevé et une augmentation du volume de fluides hydrothermaux circulant dans les fractures crustales. Cet apport de fluides, ou la mise en place de l'intrusion elle-même, auraient donc pu entraîner des modifications du champ de contraintes régionales et / ou locales. Cependant, aucune datation isotopique pouvant corroborer cette hypothèse n'a été effectuée à date sur les plutons de la Sierra de San Lorenzo; l'âge de ces intrusions doit donc être extrapolé. De plus, aucune analyse d'inclusions fluides n'a été effectuée sur les minéraux hydrothermaux, autant dans les veines que dans les failles. Sans ces analyses, on ne peut donc étudier la variation compositionnelle de la source des fluides et ainsi confirmer ou infirmer cette hypothèse.

Quoique la première hypothèse semble valable pour le demi-graben d'Aljibes, cette migration horizontale de la frontière entre les provinces volcaniques a eu lieu vers la fin du Miocène, entre des provinces différentes de celles situées à proximité de Velardeña, dans une région situées à plusieurs centaines de kilomètres au sud de Velardeña. D'après les évidences de terrain (tel la plus grande quantité de fluides ayant circulé dans les failles que dans les veines, de même que la mise en place tardive de certains plutons, comme par exemple Copper Queen), la seconde hypothèse nous apparaît la plus probable.

## **5. SYNTHÈSE STRUCTURALE ET INTERPRÉTATION GÉNÉTIQUE**

L'interprétation des veines situées à l'ouest de la faille Buenaventura suggère que celles-ci représentent l'extension du système de veines Terneras à l'est de la faille Buenaventura, mais à un niveau d'érosion moins profond. Donc, les failles de la région juxtaposent le sommet du système hydrothermal à l'ouest avec la zone minée à l'est. Cette interprétation se base sur la rétrodéformation effectuée, la comparaison de la minéralogie des veines de part et d'autre de la faille Buenaventura et la comparaison avec la veine Los Muertos (Pinet, 1999). Cette veine montre une section verticale plus complète du système hydrothermal, dont le sommet est caractérisé par plusieurs éléments similaires aux affleurements situés à l'ouest de la faille Buenaventura, i.e. l'abondance de calcite, les textures, le contenu plus faible en métaux précieux, des teneurs irrégulières, etc.

### **5.1. Scénario de corrélation de part et d'autre de la faille Buenaventura**

La corrélation des veines de part et d'autre de la faille Buenaventura est un des buts principaux de cette maîtrise. Pour ce faire, nous avons avancé plusieurs possibilités, en éliminant successivement celles qui étaient les moins probables. De nombreuses considérations ont été prises en compte dans l'élimination des différentes possibilités.

- L'analyse des données structurales afin de sélectionner des corrélations de veines compatibles d'un point de vue d'orientation et de pendage;
- Une reconstruction géométrique pour vérifier si les corrélations sont plausibles d'un point de vue géographique (positions des veines sur le terrain). i.e., si les rejets horizontaux demeurent du même ordre de grandeur pour les différentes corrélations de veines de part et d'autre de la faille Buenaventura;
- L'étude de la minéralogie des différentes veines, autant microscopique que macroscopique, pour vérifier la similitude des compositions et;

- Une analyse des teneurs relatives en métaux de base et en métaux précieux et des rapports entre ces divers métaux, pour déterminer des similitudes au niveau des teneurs des différentes veines (tableau 4).

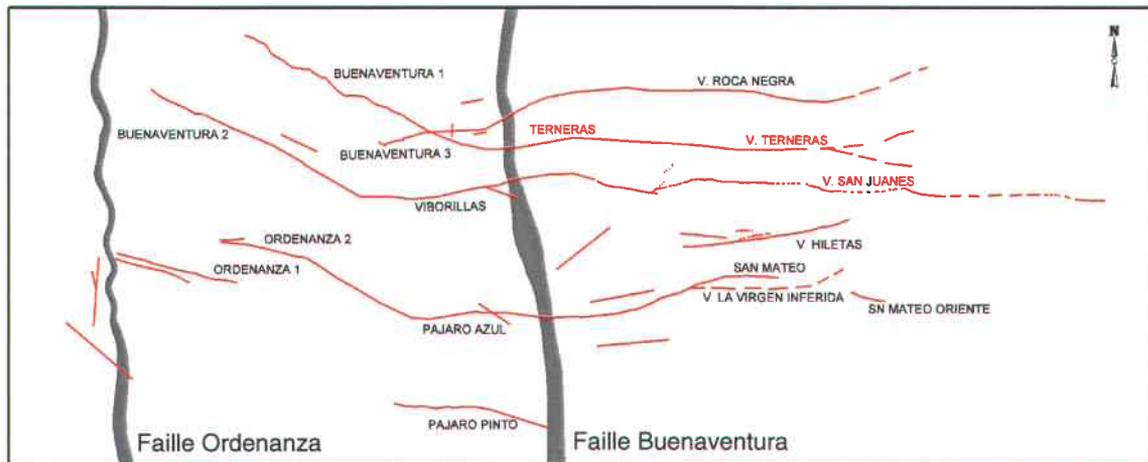
Nous avons terminé notre sélection sur un scénario. Ce scénario propose les corrélations suivantes:

1. Buenaventura 1 – Terneras
2. Buenaventura 2 – Viborillas – San Juanes
3. Buenaventura 3 – Roca Negra
4. Ordenanza 2 – Pajaro Azul – San Mateo

Cette hypothèse est appuyée par les considérations suivantes :

1. Le rejet latéral nécessaire pour chacune de ces corrélations est très semblable.
2. Les deux veines du groupe 1 possèdent des compositions similaires, ne montrent pas de trace de malachite et ont des largeurs comparables, soit jusqu'à 2 mètres.
3. Pour le groupe 2, on retrouve des quantités mineures de malachite dans les trois veines. Pour ce qui est de la dimension, les trois veines ont des largeurs comparables, soit moins de 0.5 m chacune. Il y a cependant un problème de pendage entre les veines. La veine B2 possède un pendage sud, tandis que San Juanes possède un pendage vers le nord. Il est à noter que les pendages de ces veines sont très abrupts, soit plus de 75°. Lorsque l'on considère la veine Viborillas, qui fait le lien entre les deux, on remarque que sa partie ouest, du côté de B2, est de pendage sud tandis que sa partie est, du côté de San Juanes, est de pendage nord. Donc, avec des variations de pendages de l'ordre de 20° - 30°, on doit accepter un certain degré d'incongruence dans les pendages des veines.
4. Pour le groupe 3, la différence de largeur est importante, soit moins de 0.4 m pour B3 et entre 0.2 et 2 m pour Roca Negra, qui a cependant une largeur moyenne de 0.5 m. Il est aussi à noter que dans les calcaires, les veines ont tendance à

s'amincir comparativement à leur largeur dans l'intrusion. Cette différence de largeur peut donc être attribuée à des variations lithologiques de l'encaissant.



**Figure 20: Reconstruction géométrique du scénario. (Trace des failles majeures pour référence seulement)**

- Comme pour le groupe 2, les veines du groupe 4 possèdent toutes des quantités mineures de malachite et la minéralogie, dans la zone à sulfures pour les veines Pajaro Azul et San Mateo, comprend de l'hématite, des oxydes de manganèse, de la sphalérite, de la galène, de la pyrite et de la chalcopryrite. Leurs largeurs varient beaucoup cependant; Ordenanza 2 (dans les calcaires) possède une largeur maximale de 0.5 m, Pajaro Azul, qui se trouve dans l'intrusif, de 0.5 à 2 m et San Mateo possède une largeur variable (largeur moyenne de 0.5 m).

Une reconstruction géométrique détaillée (fig. 20) fut effectuée selon les corrélations de ce scénario. Celle-ci montre que la quantité de mouvement nécessaire sur les failles subsidiaires est relativement constant et de grandeur raisonnable (mouvement horizontal et vertical < 5 - 50m).

Il suffit maintenant de faire les calculs de rejet pour confirmer la validité de notre choix de même que pour déterminer la profondeur à laquelle se trouvent les zones fertiles à l'ouest de la faille Buenaventura. Nous allons faire ce calcul en utilisant la formule suivante :

$$\text{Rejet vertical} = \text{rejet horizontale} \times \text{TAN (plongé des stries)} \times \text{SIN (pendage faille)}$$

Nous avons d'abord mesuré le rejet horizontal sur la faille Buenaventura des veines corrélées. Pour les veines qui ne sont pas en contact avec la faille, nous avons extrapolé leur point de contact probable en comparant avec les autres veines mineures et majeures qui sont en proximité et qui elles sont en contact avec la faille Buenaventura. Pour les veines B1 - Terneras, le rejet horizontal est de 145 m, pour les veines B2 - Viborillas - San Juanes de 139 m, pour B3 - Roca Negra de 145 m et pour O2 - Pajaro Azul - San Mateo de 154 m. La plongée des stries sur la faille Buenaventura varie entre  $60^\circ$  et  $80^\circ$  donc nous prendrons une moyenne de  $70^\circ$ . Le pendage de la faille est de  $78^\circ$ .

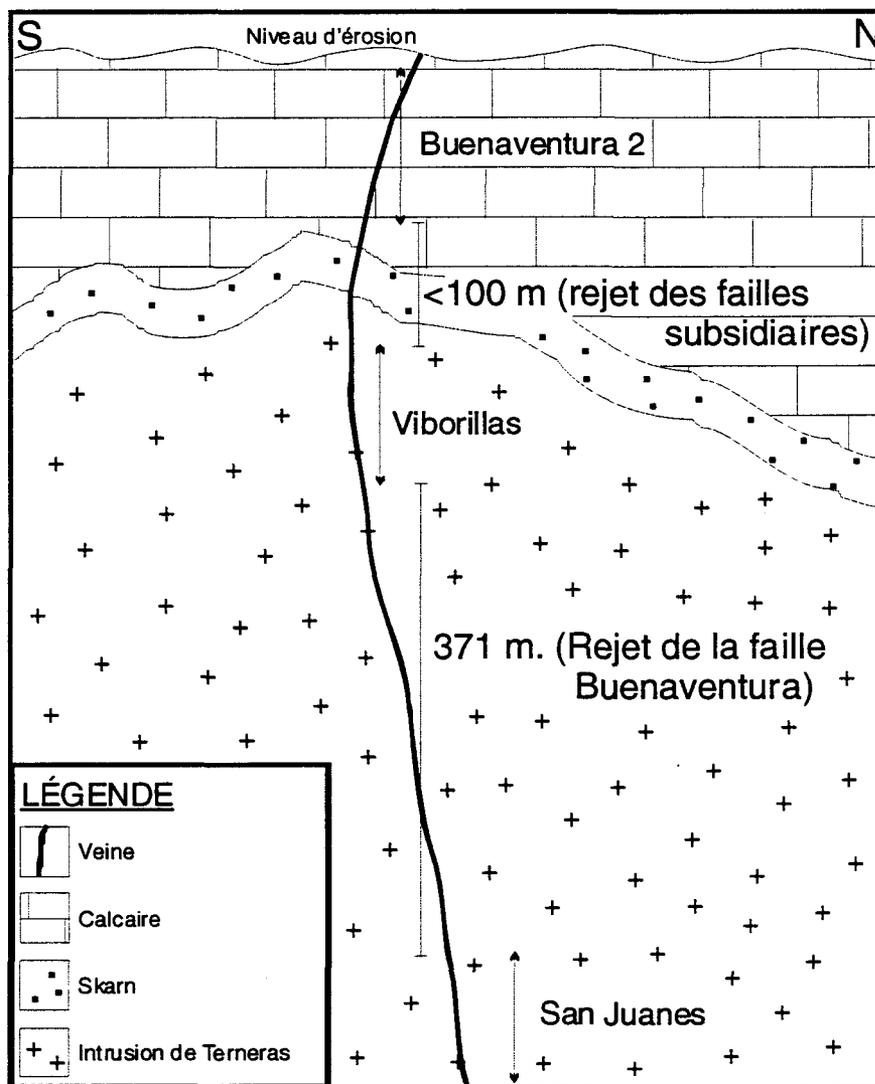


Figure 21: Profil vertical idéalisé de la corrélation B2 - Viborillas - San Juanes.

En effectuant ce calcul, nous obtenons un rejet vertical pour la corrélation B1 - Terneras de 389 m. En effectuant un calcul similaire pour les autres corrélations de veines proposées, soit B2 + Viborillas + San Juanes, B3 + Roca Negra et O2 + Pajaro Azul + San Mateo, on obtient des valeurs de rejet similaires, soit 371 m, 389 m et 414 m. respectivement.

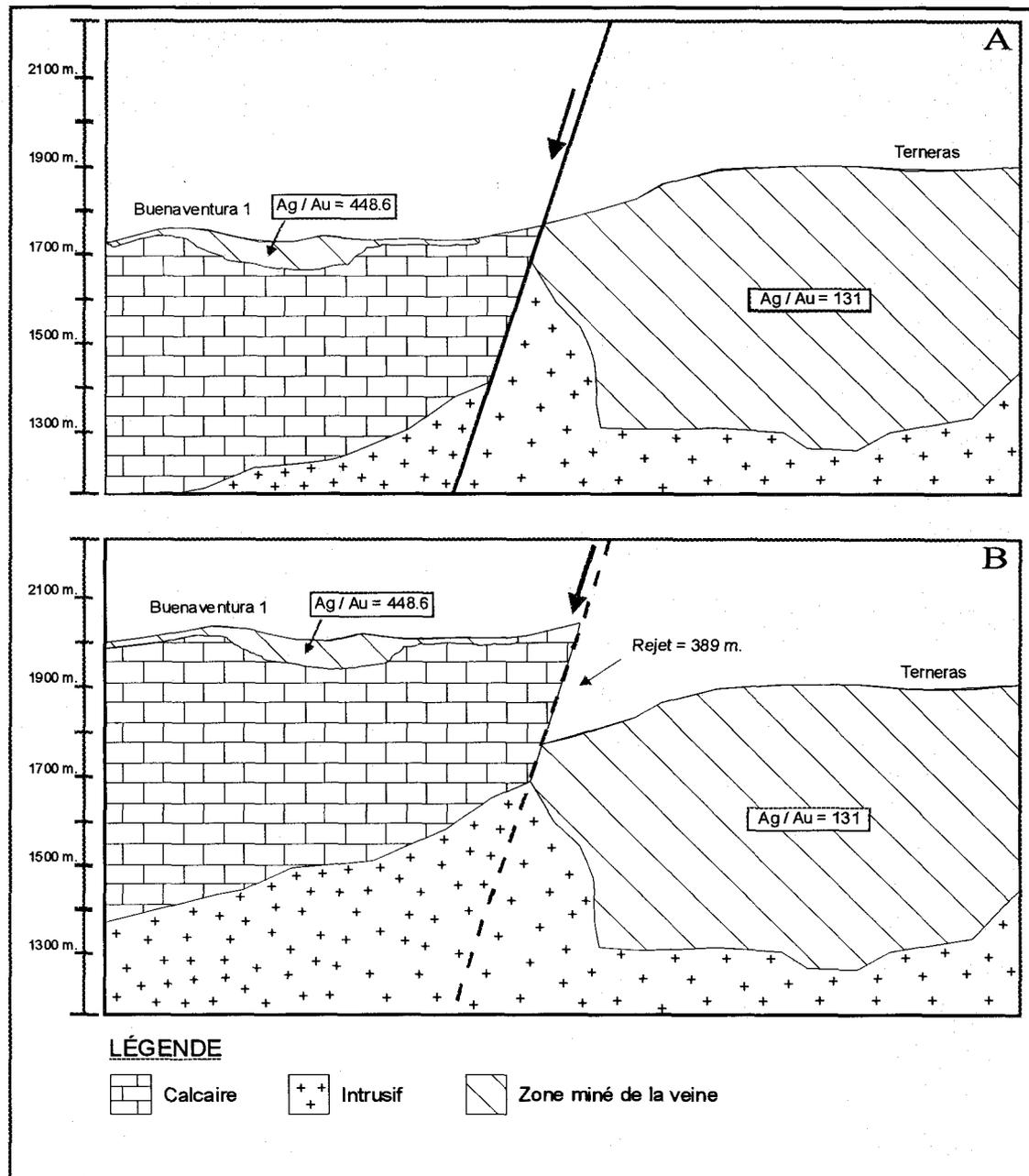


Figure 22: Coupe longitudinale des veines Terneras et Buenaventura 1 post- (A) et pré-déformation (B).

Les implications pour les zones économiques en profondeur des veines à l'ouest de la faille Buenaventura sont importantes. Nous avons maintenant un modèle qui nous permet de calculer de façon assez exacte la profondeur possible des zones économiques à l'ouest de la faille Buenaventura équivalentes aux zones actuellement exploitées à l'est de la faille (pour les veines B2 - Viborillas - San Juanes, fig. 21).

Les zones économiques situées à l'est de la faille Buenaventura débutent en surface et continuent à des profondeurs variables, mais se trouvent tous dans l'intrusif. La veine Terneras a un intervalle exploité de 550 m et la veine San Mateo 300 m minimum, la base n'étant pas encore exploitée. Il est donc possible de proposer qu'entre 349 m et 899 m de profondeur sur la veine Buenaventura 1 (rejet vertical (389m) - différence d'altitude moyenne entre B1 et Terneras (40m) = 349 m), il y a la possibilité de trouver des concentrations économiques de minerai (fig. 22). Par un calcul similaire pour les autres veines (toujours en considérant la topographie), on peut estimer l'intervalle minéralisé sous Pajaro Azul comme étant situé entre 380 m et au moins 680 m et sous Ordenanza 2 entre 360 m et au moins 660 m. Pour le groupe Buenaventura 2 + Viborillas + San Juanes, la profondeur du début de l'intervalle économique se situerait aux environs de 360 m sous Viborillas et environ 320 m sous Buenaventura 2. Cependant, considérant que les meilleures teneurs se trouvent dans l'intrusif, il est plus probable que l'extension en profondeur des veines Viborillas, Pajaro Azul et Pajaro Pinto soit plus prometteuse.

## **5.2. Hydrothermalisme des structures syn- vs post-minéralisation**

La minéralisation épithermale en métaux précieux se développe contemporanément dans des régions de tectonisme et de volcanisme actifs, pour lesquelles les failles donnent accès à des fluides de réservoirs relativement profonds à haute température et les mène à un environnement peu profond. L'identification de tels contrôles structuraux par l'analyse de l'architecture des bassins et des ceintures volcaniques est donc importante pour l'exploration de gisements d'or épithermaux (Henley et Adams, 1992).

Les études sur l'hydrothermalisme sont nombreuses pour plusieurs régions avoisinant celle de Velardeña (fig. 23), telles les régions de Santa Maria (Gilmer et al., 1988),

Santa Barbara (Grant et Ruiz, 1988), Fresnillo (Koch et Link, 1967; Albinson, 1988; Gemmel, 1988; Simmons, 1991), Tayoltita (Smith et al., 1982; Clarke et Titley, 1988; Conrad et al., 1992), Guanajuato (Gross, 1975), Zacatecas (Ponce et Clark, 1988) et Pachuca - Real del Monte (McKee, Dreier et Noble, 1992).

Les gisements de type épithermal acide se forment à l'intérieur ou très près d'intrusions servant de moteur thermique au système hydrothermal. Les gisements de type épithermal neutre sont éloignés de la source de chaleur et se forment dans des roches ayant des structures favorables et la capacité de maintenir un système de "plomberie" adéquat (Heald et al., 1987). À Velardeña, la présence d'adulaire (?) observée par les géologues de la mine dans la veine Santa Juana (et décrit plus à l'est par Spurr et Garey (1908)), le caractère des veines (i.e. veines d'extension), la présence de galène et de sphalérite, la présence de textures colloformes-crustiformes et de «bladed calcite» dans ces veines, le volcanisme associé de type acide (rhyolites) et la continuité latérale des veines suggèrent que le dépôt est un gisement épithermal neutre (de type adulaire-séricite).

Les études isotopiques (Loucks et al., 1988; Foley et al., 1989; Simmons, 1991) ont montré que la formation de minéralisation hydrothermale dans des gisements épithermaux à Ag-Au est le produit de solutions hydrothermales dominées par l'eau météorique. Des intrusions peu profondes sont typiquement associées à de tels dépôts et sont postulées comme étant les moteurs de chaleur responsable des mouvements convectifs de l'eau souterraine (Taylor, 1973)

La minéralisation dans la Sierra de Santa Maria est spatialement et temporellement associée à la mise en place de dykes rhyolitiques, de porphyres et de stocks de trachyandésite datés à  $33.1 \pm 1.4$  Ma (K-Ar, Felder, 1979). La datation K - Ar de Gilmer et al. (1988) sur la fluorite dans la zone minéralisée donne un âge de  $32.1 \pm 1.4$  Ma. Leur analyse d'inclusions fluides et d'isotopes de soufre suggère que ces fluides hydrothermaux (des saumures avec 30 – 50 equiv. wt. % NaCl) étaient en équilibre avec le magma; l'hydrothermalisme et le magmatisme étaient donc contemporains. Ils affirment également que les similarités minéralogiques entre les différentes zones minéralisées de même que les âges par traces de fission similaires de la fluorite associée aux sulfures tardifs suggèrent que toute la minéralisation en sulfures dans le

dôme s'est produite lors d'un seul événement minéralisateur plutôt qu'en une série d'événements. L'âge de l'événement minéralisateur, 29 à 33 Ma, est similaire à ce que l'on retrouve dans d'autres districts miniers autour de Velardeña (tableau 3).

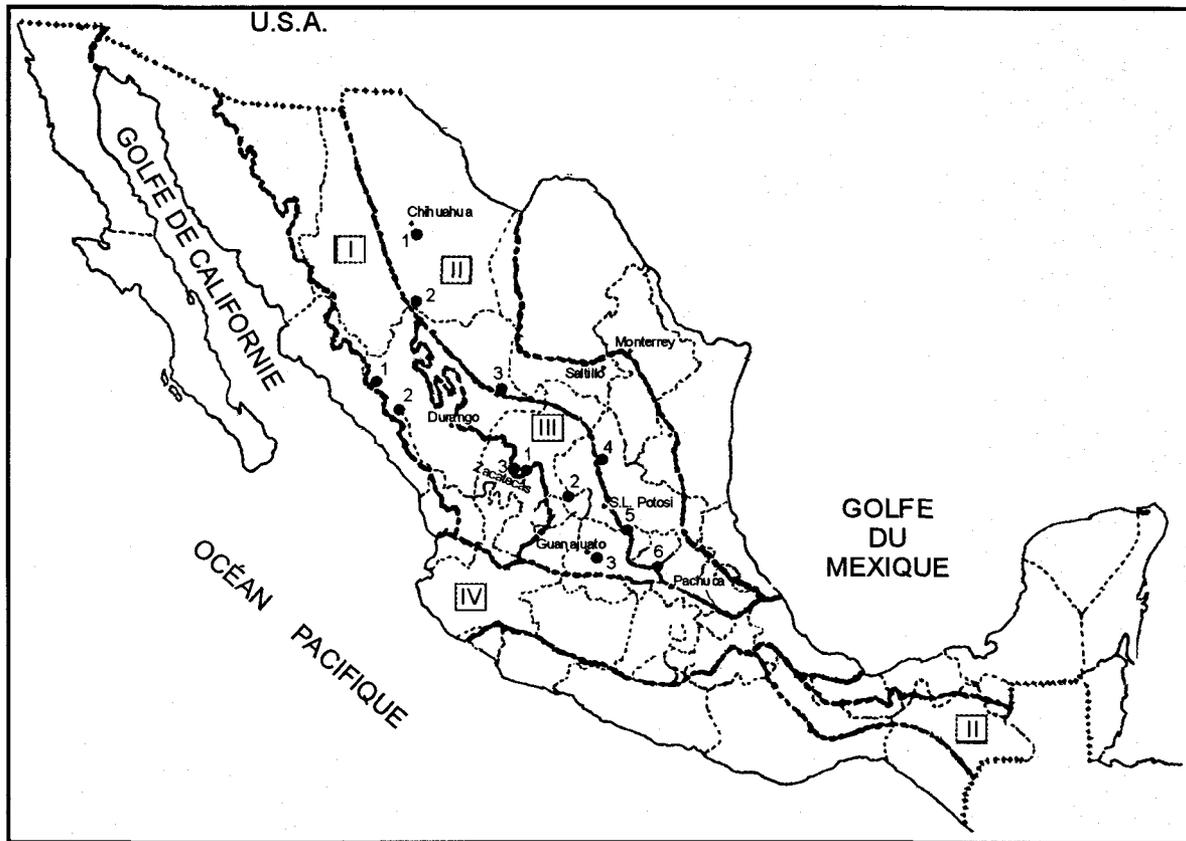


Figure 23: Localisation de gisements discutés dans ce mémoire. I. Sierra Madre Occidentale : 1, Topia, Durango; 2, Tayoltita, Durango; 3, San Martin, Zacatecas. II. Sierra Madre Orientale : 1, Santa Eulalia, Chihuahua; 2, San Francisco del Oro, Chihuahua; 3, Velardeña, Durango; 4, Charcas, San Luis Potosi; 5, El Realito, Guanajuato; 6, Pachuca-Real del Monte, Hidalgo. III. Mesa Central : 1, Fresnillo, Zacatecas; 2, Real de Angeles, Zacatecas; 3, Guanajuato, Guanajuato. IV. Ceinture volcanique Trans-Mexicaine. (Modifié de Salas, G.P., 1991).

Le système hydrothermal de Fresnillo fut alimenté en profondeur par des magmas de composition felsique à intermédiaire. Le réservoir de saumure s'est formé au-dessus du magma qui cristallisait. Au-dessus de ce réservoir, une cellule convective d'eau chlorée, diluée, avec un pH presque neutre, existait, utilisant des fractures perméables et des failles comme conduits. Occasionnellement, des saumures de source plus profonde furent injectées dans ces mêmes fractures, précipitant ainsi des sulfures et des sulfosels. Des analyses d'inclusions fluides d'autres dépôts hydrothermaux à Ag-Pb-Zn

tel Creede (Foley et al., 1989) et Topia (Loucks et al., 1988) indiquent également l'existence de salinité fluide contrastante à l'intérieur d'un même conduit (Simmons, 1991).

Ce que l'on a à Velardeña pourrait ressembler au modèle proposé pour Fresnillo. C'est-à-dire qu'une intrusion de composition felsique à intermédiaire (soit l'intrusion de Guardarraya, soit l'intrusion de Copper Queen, à l'est de la zone cartographiée) serait le moteur de convection et la source des éléments métallifères. Une cellule convective d'eau chlorée, diluée et dominée par l'eau météorique, tel que c'est le cas pour les systèmes « low sulfidation », aurait participé au drainage des fluides vers les fractures (veines) de la propriété.

La structure des veines à Fresnillo est aussi similaire à celle des veines de la propriété de Velardeña. À Fresnillo, il y a quatre épisodes de formation de matériel dans les veines (Gemmell et al., 1988). Ceux-ci enregistrent de nombreuses ouvertures de fissures qui ont fourni un conduit pour les solutions hydrothermales responsables de la formation de minéraux dans la veine Santo Niño, la veine la plus large et la plus riche du district minier. Les épisodes 1 et 2 sont des périodes de bréchification hydrothermale. L'épisode 3 montre des textures crustiformes bien développées et l'épisode 4 contient de la calcite massive, grossièrement cristalline. La composition en sulfures et en sulfosels (pyrite, sphalérite, galène, pyrargyrite, polybasite, chalcopryrite, arsénopyrite, tétrahédrite et autres minéraux accessoire), en oxydes (limonite, hématite, oxydes de MN, malachite, azurite et argent natif) et en minéraux de gangue (quartz, calcédoine, calcite, chlorite et argiles) ressemble énormément aux compositions des veines de la mine Velardeña.

La zonation des métaux de base et des métaux précieux ou les variations des rapports de ceux-ci peuvent être utilisées pour illustrer l'évolution chimique d'un système hydrothermal le long d'un gradient physicochimique. Généralement, les études de zonation considèrent les variations longitudinales (sur une même veine) des rapports entre deux métaux, par exemple Ag/Pb, pour reconnaître l'hydrothermalisme tardif et stérile. La variation des différents rapports est généralement interprétée comme représentant la direction d'écoulement des fluides (Goodwell et Petersen, 1974; Grant et Ruiz, 1988).

Le district minier de Tayoltita, dans l'état de Durango, montre un rapport Ag/Au croissant avec des teneurs et un contenu en métaux de base décroissant en s'éloignant de l'intrusion associée à la minéralisation. Ceci suggère un appauvrissement des fluides minéralisateurs en métaux en s'éloignant de l'intrusion (Henry, 1975). Park et MacDiarmid (1970) affirment que le rapport Ag/Au à Tonopah (Nevada) montre que l'Ag tend à voyager plus loin que l'Au dans les fluides hydrothermaux riches en métaux. L'implication est que la direction d'écoulement hydrothermal est indiqué par un rapport Ag/Au croissant. Outre les couples Roca Negra - B3 et San Mateo - O2, ce rapport augmente d'est en ouest, en s'éloignant des intrusions de Guardarraya et Copper Queen.

Veine (unités)	# d'éch. (#)	# d'ana. inc. Pb (#)	# d'ana. inc. Zn (#)	Au (g/t)	Ag (g/t)	As (g/t)	Cu (%)	Pb (%)	Zn (%)	Ag				
										Ag/Au	Pb/Zn	Ag/Pb	Ag/Zn	(Pb+Zn)
Ternerias	20	20	20	2,5	325,3	-	0,12	0,97	1,31	131,0	0,7	336,5	249,1	143,2
Buenaventura1	89	0	0	0,3	136,6	0,17	-	-	-	448,6	-	-	-	0,0
Roca Negra	3	2	2	0,0	245,0	-	-	0,86	0,26	-	3,3	-	-	0,0
Buenaventura3	6	1	1	1,6	208,9	0,34	0,04	2,60	0,70	131,8	3,7	80,3	298,4	63,3
Sn. Juanes	255	134	279	13,7	983,2	-	2,83	0,50	0,50	71,7	1,0	1969	1958	981,7
Viborillas	2	2	2	1,0	265,0	-	0,16	0,50	0,55	265,0	0,9	530,0	481,8	252,4
Buenaventura2	16	1	1	1,4	170,5	0,22	0,01	0,60	1,30	123,3	0,5	284,2	131,2	89,7
Sn. Mateo	552	160	408	2,4	327,9	-	0,20	3,58	2,11	135,2	1,7	91,5	155,7	57,6
Ordenanza2	18	2	2	0,6	58,5	0,18	0,04	0,80	0,30	93,5	2,7	73,1	194,9	53,2

**Tableau 4: Teneurs des veines de la propriété minière Velardeña et rapports de certains métaux, réunis selon les corrélations proposées. (Les concentrations en cuivre se trouvent sur la limite du seuil de détection.)**

À Velardeña, outre les couples Roca Negra - B3 et San Mateo - O2, le rapport Ag/Au augmente vers l'ouest (tableau 4), en s'éloignant des intrusions de Guardarraya et Copper Queen qui se trouvent à l'est (fig. 9). Sur des arguments cartographiques (i.e. toutes les veines convergent vers Guardarraya), Pinet (1999) interprète la direction d'écoulement comme étant probablement horizontale plutôt que verticale et donc la source des fluides comme étant à l'est (possiblement l'intrusion de Guardarraya), plutôt qu'en profondeur. Certaines veines auraient canalisé les fluides minéralisateurs à des périodes légèrement différentes (ouverture sélective d'une veine par rapport à une autre), d'où la variation minéralogique que l'on observe. Par exemple, dans les veines San Juanes et Las Hiletas, le contenu en cuivre est élevé alors qu'environ 80 mètres au nord (veine Ternerias) et au sud (veine San Mateo), les veines sont caractérisées par un contenu élevé en Pb et Zn. Les veines dans le toit de la faille Buenaventura sont

généralement plus pauvre en Au et en Ag que les veines à l'est de la faille. Aussi, en contraste avec le système de veines Santa Juana, le système de veines de Terneras est pauvre en Arsenic.

Les variations de composition minéralogique entre les différentes veines cartographiées, telles que décrites plus haut (section 3.2), peuvent résulter de plusieurs facteurs autre que 2 événements hydrothermaux différents, tels (Rye, 1966):

1. les conditions P-T-X de la source des fluides;
2. le mélange de fluides météoriques et magmatiques;
3. l'ébullition;
4. l'incorporation de sels sédimentaires;
5. l'ouverture sélective de différentes veines à un moment donné de l'évolution hydrothermale du système;
6. une combinaison de ces différents facteurs.

La géométrie des veines (elles forment un motif radiale autour de l'intrusion de Guardarraya où l'on trouve des cheminées minéralisées dans le prolongement des veines) (Pinet, 1999), les rapports de métaux de base et précieux de même que les différences dans la minéralogie des veines du toit et du mur de la faille Buenaventura (qui proviennent de paléo altitudes différentes) suggèrent que ce "moteur" thermique était situé plus à l'est du dépôt. L'intrusion de Guardarraya (ou de Copper Queen), est considérée comme étant le moteur de convection du système hydrothermal minéralisateur. Cette intrusion fut probablement mise en place à la même époque que l'événement tectono-hydrothermale ayant formée les failles et les veines de la propriété (voir 5.4). Comme c'est le cas pour diverses mines énumérées dans le tableau 3, si l'hydrothermalisme à Velardeña aurait suivi les mêmes mécanismes que les mines dans le tableau 3, cet événement hydrothermal aurait suivi la mise en place du pluton en cause sur une période d'environ 2 Ma.

Les failles de la propriété (les failles majeures et les failles subsidiaires) ne sont pas métallifères. Par endroits, où elles recoupent des veines contenant des sulfures et / ou des oxydes par exemple, on peut retrouver de petites quantités de minéraux économiques, tel la malachite par exemple (EH-22). Les failles contiennent les mêmes

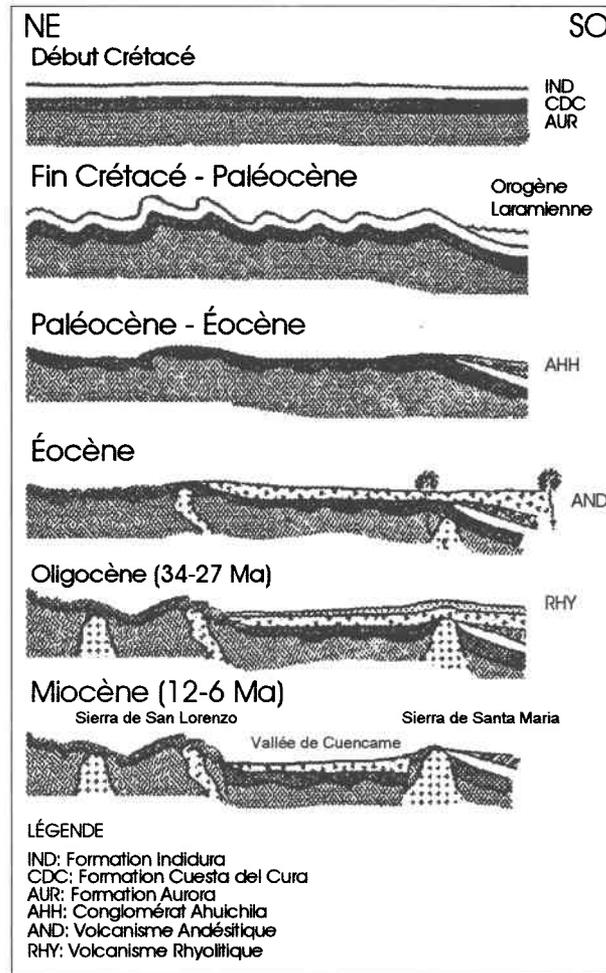
minéraux de gangue que les veines, i.e. de la calcite, du quartz, de la calcédoine, de l'hématite, des oxydes de Mn et de la barite. Cependant, la quantité de fluides ayant circulé dans ces failles, surtout les deux failles majeures, est de beaucoup supérieure à ce que l'on retrouve dans les veines.

Les arguments suivants permettent donc de proposer que les veines et les failles de la propriété Velardeña sont issues d'un même événement hydrothermal : 1) leurs compositions similaires, 2) l'existence, régionalement, d'une période métallifère au Mexique à cette époque (Albinson, 1988) et 3) le caractère syntectonique de l'intrusion de Guardarraya.

### **5.3. Modèle structural et génétique**

L'histoire géologique représentée dans la figure 24 de la région de Velardeña fut originalement proposée par Gilmer et al. (1988). Elle montre 5 étapes d'une évolution géologique composée d'événements sédimentaires, tectoniques, volcaniques, hydrothermaux et érosionnels. Cette coupe schématique NE - SW montre la succession d'événements suivante :

- 1) L'épaisse séquence de calcaire de la Formation Aurora fut sédimentée dans les mers du Crétacé inférieur. Des conditions similaires existaient lors de la sédimentation de la Formation Cuesta del Cura du début Crétacé et de la Formation Indidura du Crétacé supérieur.
- 2) Les roches sédimentaires de la région de Velardeña furent plissées lors de l'orogénèse laramienne du fin Crétacé - début Tertiaire.
- 3) Par la suite, le conglomérat d'Ahuichila fut déposé dans une vallée synclinale, au SW de La Sierra de Santa Maria, lors de la fin du soulèvement, par l'érosion des reliefs plus au nord.



**Figure 24: Histoire géologique de la région de Velardeña. (Modifié de Gilmer et al., 1988).**

4) L'Éocène est marqué par d'importants phénomènes volcaniques. Deux ensembles lithologiques sont distingués. Le plus ancien est caractérisé par l'épanchement d'une série volcanique, principalement andésitique et par la mise en place de corps intrusifs co-magmatiques. Ce "complexe volcanique inférieur" a été daté dans la région de Topia à 51-40 Ma (Loucks et al., 1988), à 45 Ma par Gilmer et al. (1988) et, régionalement, à une période s'étendant de 100 à 45 Ma (McDowell et Clabaugh, 1972; McDowell et Keizer, 1977).

5) Succédant au complexe volcanique inférieur, "le groupe volcanique supérieur" comprend principalement des rhyolites et des ignimbrites avec des quantités mineures de basaltes et d'andésites. Les données géochronologiques montrent que l'essentiel de

la mise en place de ce second groupe volcanique s'est effectué durant une période assez courte, à l'Oligocène (34 - 29 Ma) (Gilmer et al., 1988). Suite à la mise en place de l'intrusion de Terneras (environ 45 Ma), il y a eu, entre 34 et 27 Ma, la formation des roches rhyolitiques suivi par la mise en place des intrusions de Guardarraya et de Copper Queen, contemporanément du début d'une extension NE – SW. Cette extension est responsable de la formation des veines suivies par la formation des failles dans la zone d'étude.

## **6. CONCLUSIONS**

Cette étude a permis d'établir les relations structurales et génétiques entre les différents types de structures minéralisées et les différents types de failles tardives sur le site de la mine Velardeña. Les résultats de ces travaux permettent de proposer de nouvelles cibles d'exploration dans une zone où les veines minéralisées ne furent exploitées que de façon artisanale jusqu'à maintenant.

Le district minier de Velardeña a enregistré les effets d'un régime extensionnel, résultant en une topographie de type "Basin and Range". Sur le terrain, cette tectonique est soulignée par la présence d'un réseau ordonné de failles normales recoupant des veines minéralisées pré-existantes. La faille Buenaventura recoupe et abaisse vers l'ouest le niveau structural correspondant aux veines productrices situées à l'est de la faille.

Suite à la reconstruction géométrique des veines de la zone d'étude, basée sur une comparaison détaillée de leur minéralogies, de leur largeurs, de leur orientations et pendages, de leur contenu en métaux de même que leur positions relative de part et d'autre de la faille Buenaventura, les corrélations suivantes sont proposées :

1. Buenaventura 1 – Terneras
2. Buenaventura 2 - Viborillas - San Juanes
3. Buenaventura 3 - Roca Negra
4. Ordenanza 2 - Pajaro Azul - San Mateo

Ce scénario de corrélations implique que le rejet net sur la faille Buenaventura est de 391 mètres en moyenne. Ceci nous permet d'estimer l'intervalle minéralisé des zones fertiles à l'ouest de la faille à entre 349 m et 899 m sous la surface pour la veine Buenaventura 1, à entre 380 m et 680 m pour la veine Pajaro Azul, à entre 360 m et 660 m pour la veine Ordenanza 2 et à partir de 360 m pour Viborillas et 320 m pour Buenaventura 2.

L'importante quantité de fluides hydrothermaux ayant circulé dans les failles majeures est considérée comme péné-contemporaine de l'hydrothermalisme et du tectonisme

des veines minéralisées, le tout résultant d'un événement tectonique unique et incrémentale, contemporain d'une intense activité hydrothermale. Cette hypothèse est appuyée par une composition minéralogique similaire des veines et des failles, la présence de structures minéralisées dans les roches rhyolitiques affleurant dans le toit de la faille Ordenanza, un âge comparable pour la formation de plusieurs gisements épithermaux du nord du Mexique et le caractère syntectonique de l'intrusion de Guardarraya. Les failles majeures et les veines minéralisées formant un angle d'environ 75°, il semble, à priori, difficile de générer une telle géométrie lors d'un événement tectonique unique sans faire varier l'orientation des contraintes principales. Nous avançons donc l'hypothèse que cette géométrie résulte de la variation dans l'orientation et l'amplitude des contraintes principales  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$ , suite à une importante augmentation de l'apport de fluides entre la formation des veines minéralisées et la formation des failles tardives. Cette hypothèse est d'ailleurs appuyée par les observations de terrain, i.e. il y a un volume beaucoup plus important de fluides dans les failles que dans les veines.

La minéralisation et l'hydrothermalisme contemporains de même que le magmatisme rhyolitique seraient issues d'une même suite d'évènements supracrustaux, qui sont contemporains d'un régime en extension et du magmatisme associé dans le nord du Mexique, interpolée ici comme ayant existé entre 34 et 27 Ma.



Appendice A

Photographies macroscopiques et microscopiques des veines et des failles de la  
propriété de la mine Velardeña

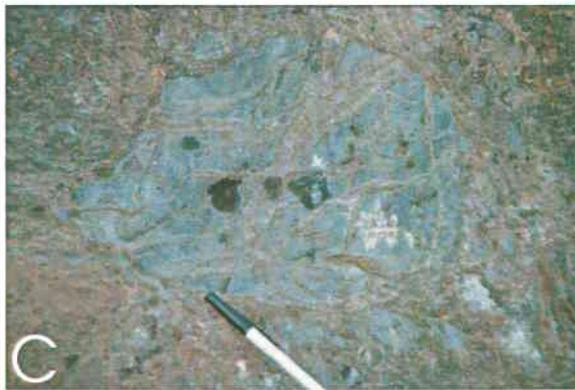
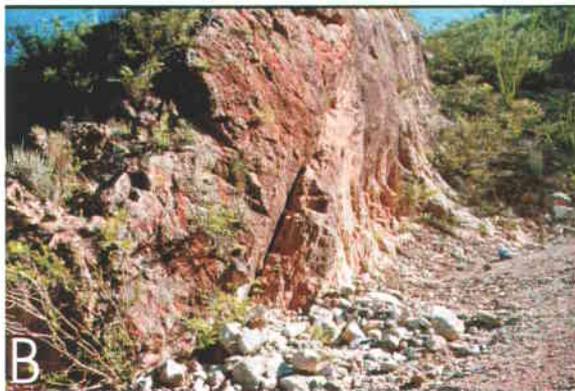


Planche 1: a) vue vers le sud de la veine Terneras et de la faille Buenaventura qui la recoupe; b) vue vers le nord de la faille Buenaventura sur le chemin Terneras (échelle : largeur de photo = 8 m); c) fragment de calcaire recoupé par des veinules dans la faille Buenaventura (échelle : crayon = 15 cm); d) stries "downdip" visible sur plan de faille (échelle : diamètre du couvre-lentille de caméra = 5 cm).

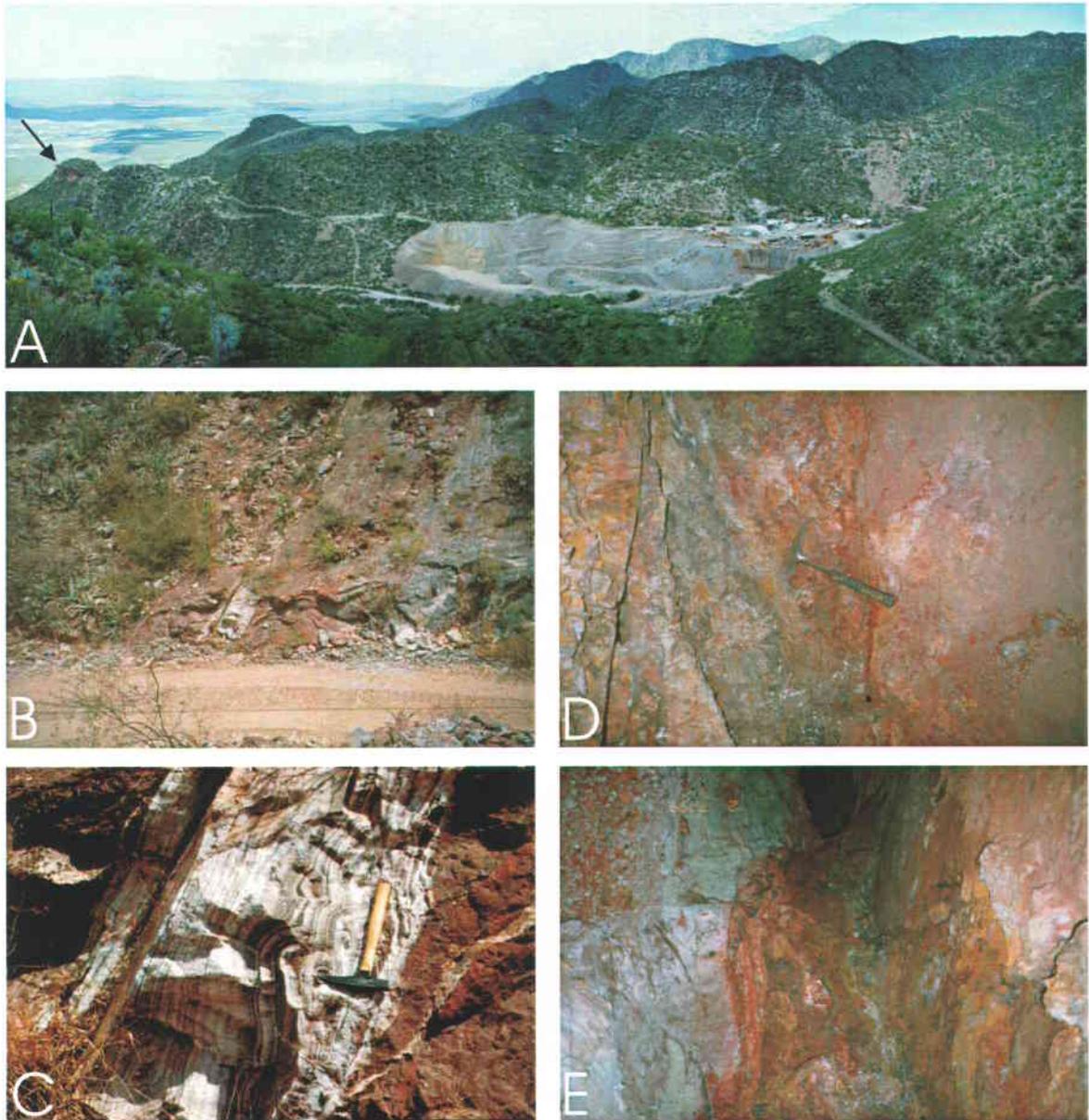


Planche 2: a) Panorama vue vers le NO, à côté de la veine Pajaro Azul, des bureaux de la mine ainsi que du tas de déblais principal et la route de la mine. Les rhyolites dans le toit de la faille Ordenanza représentent le sommet du dernier butte à gauche de la photo (flèche noire); b) vue vers le nord de la faille Ordenanza, sur la route Ordenanza (échelle : largeur de la route = 3 m); c) vue rapprochée de b) où l'on voit bien l'hydrothermalisme de la faille (échelle : marteau = 30 cm); d) faille subsidiaire de composition similaire aux failles majeures; e) faille subsidiaire dans les volcanites (échelle : largeur de la photo = 1 m).

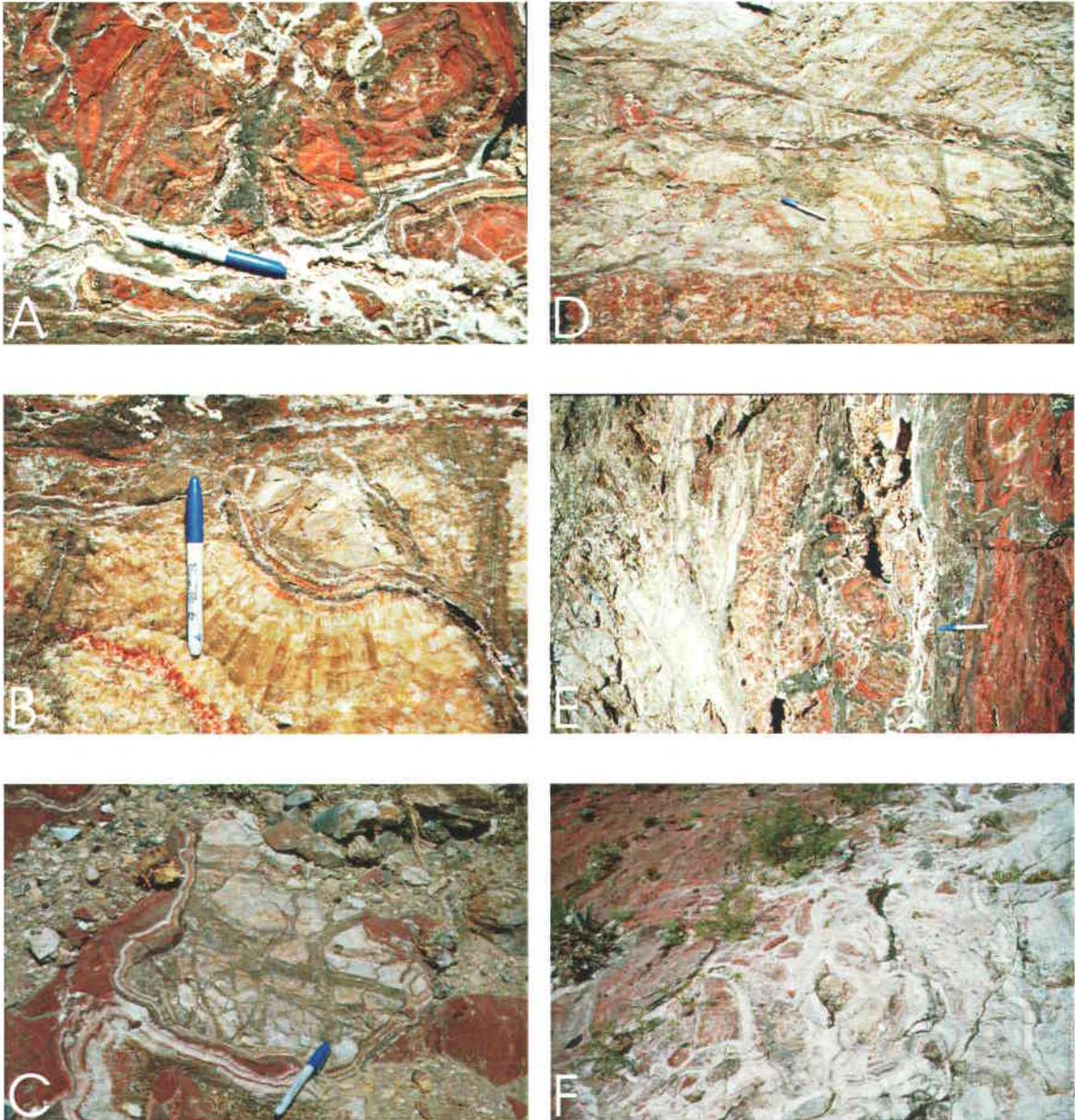


Planche 3: Photos de différents faciès visible dans la faille Ordenanza. a) faciès de brèche hydrothermale dans la faille Ordenanza. Veine de calcite (textures crustiformes, géodes) dans une matrice de calcite, d'hématite et d'oxydes de manganèse (échelle : longueur du crayon = 15 cm); b) les cristaux de calcite atteignent des longueurs allant jusqu'à 10 cm dans les textures crustiforme-colloforme et coccarde autour d'un fragment de calcaire; c) fragments de calcaire bréchifié et recoupés par de nombreuses veinules; d) limite entre faciès 4 et 5, avec des textures colloformes et crustiformes; e) textures crustiformes et colloformes, géodes de différentes tailles, fragments de brèches et des zones massive à hématite et calcite; f) limite entre le faciès 3 et le faciès 4. Présence de textures crustiformes et colloformes dans la calcite (échelle : largeur de la photo = 3 m).

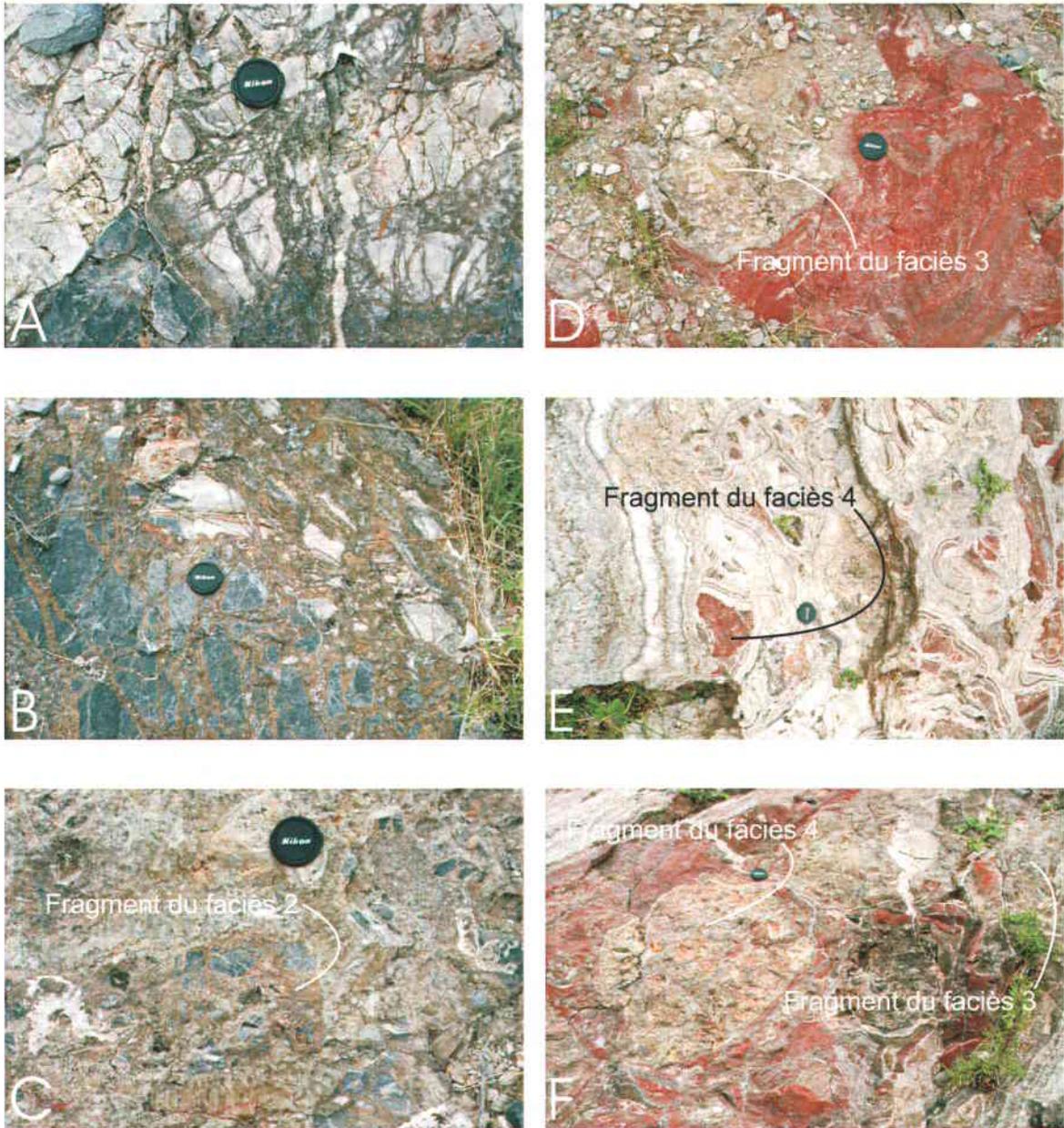


Planche 4: Photos de différents faciès visible dans la faille Ordenanza. Se référer au schéma de la figure 14. a) Faciès 1, faciès de stockwork de calcite dans calcaire hautement fracturé, presque bréchiq (échelle : diamètre de couvre-lentille de caméra = 5 cm); b) faciès 2, faciès de brèche hydrothermale, plus bréchiq que le faciès 1; c) faciès 3, faciès de brèche hydrothermale avec un fragment du faciès 2; d) faciès 4, faciès de brèche hydrothermale avec fragment du faciès 3; e) faciès 5, faciès de brèche hydrothermale avec fragment du faciès 4; f) faciès 6, faciès de brèche hydrothermale avec fragment des faciès 3 et 4.

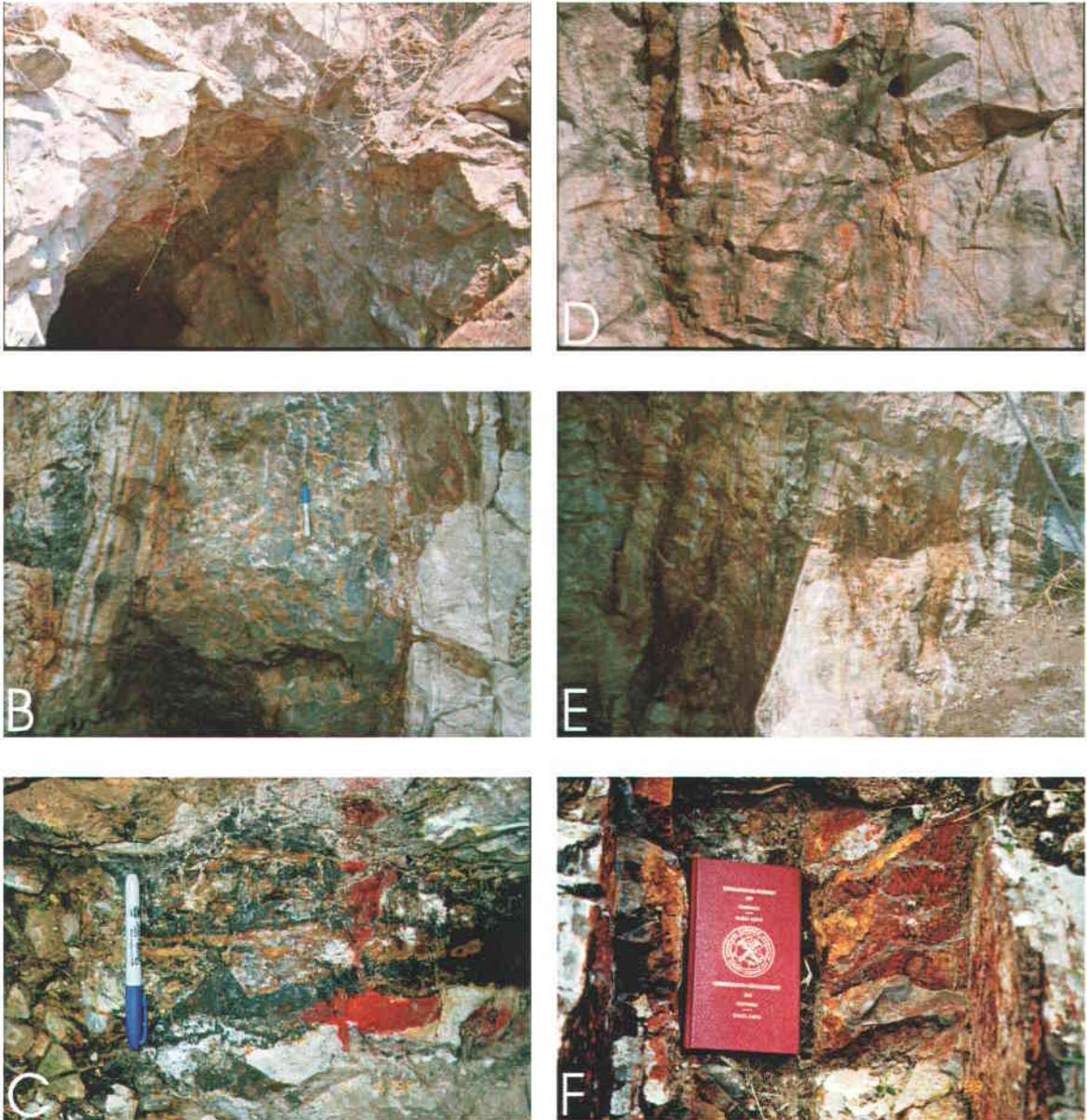


Planche 5: a) La veine Buenaventura 1, vue vers l'est (échelle : largeur de photo = 2 m); b) veine Buenaventura 1 bréchique, avec de belles textures crustiformes (échelle : crayon = 15 cm); c) la veine Buenaventura 3 est bréchique et contient une grande quantité d'oxydes de manganèse; d) vue rapproché de la photo a) La veine se compose de calcite, d'hématite, d'oxyde et d'oxyde de manganèse (matériel sombre, à côté du crayon). Cette veine est, par endroit, anastomosée (échelle : largeur de photo = 40 cm); e) la veine Buenaventura 1 à cet endroit présente plusieurs épisodes de "crack and seal" (échelle : largeur de photo = 1 m); f) la veine Buenaventura 2 se compose elle aussi d'oxydes, d'oxydes de manganèse, d'hématite et de calcite, et est large d'environ 30 à 40 cm (échelle : largeur du carnet = 10 cm).

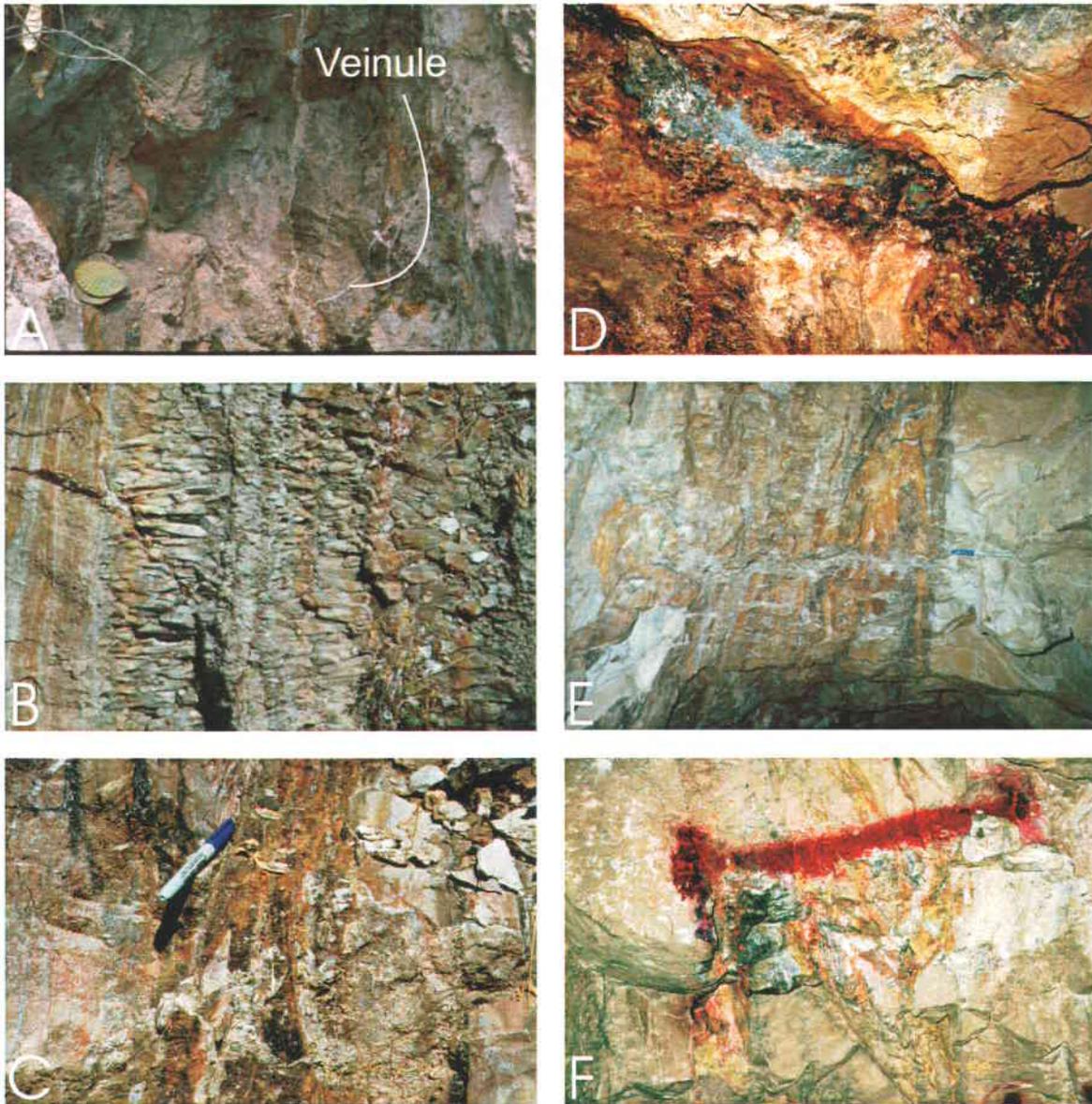


Planche 6: a) La veine Viborillas recoupée par des veinules tardives de calcite stérile (échelle : feuille de cactus = 5 cm); b) texture crustiforme-colloforme dans une veine mineure de calcite stérile (échelle : photo large de 40 cm); c) la veine Ordenanza 1 se compose de calcite, d'oxydes, d'hématite et d'oxydes de manganèse (échelle : crayon); d) la veine Santa Juana sous terre. On voit ici la présence d'azurite et de malachite avec une quantité impressionnante d'oxydes (échelle : photo large de 1 m); e) cette veine mineure, montrant quelques textures crustiformes, se compose d'oxydes, de calcite, d'hématite et d'oxydes de manganèse (minéraux noir) (échelle : crayon); f) la veine Ordenanza 2 (largeur de la trace de peinture rouge) se compose de calcite, d'oxydes, d'oxydes de manganèse et peu ou pas d'hématite. Elle est parfois anastomosée et recoupée par des veinules de calcites stériles (échelle : photo large de 0.7 m).

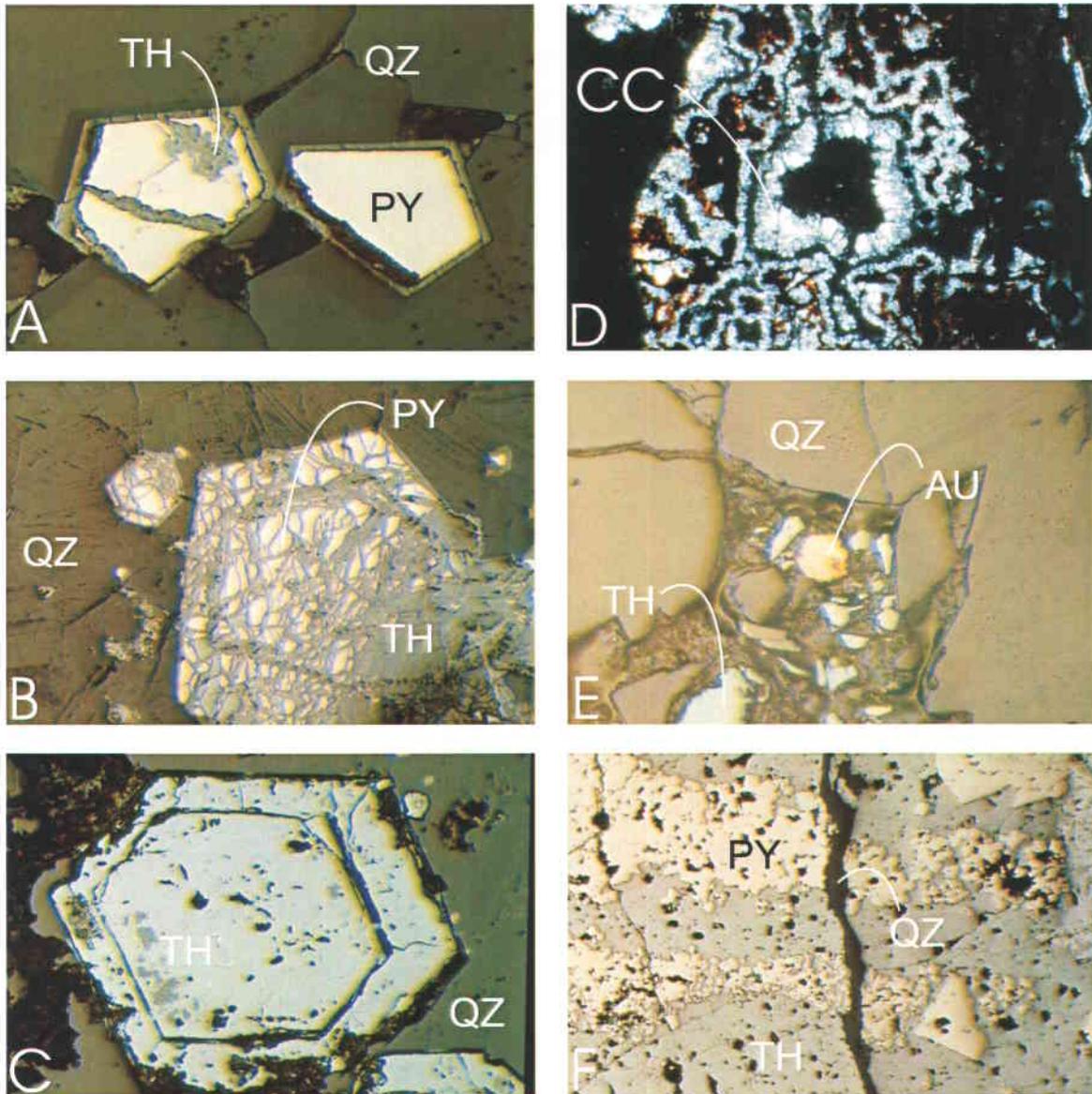


Planche 7: Les photos a, b et c montrent les phases initiale, médiane et finale du remplacement de la pyrite par la tétrahédrite; a) veine Terneras, (grossissement: 10X; largeur de la photo: 2mm); b) veine Viborillas, (grossissement: 10X; largeur de la photo: 2mm); c) veine Terneras, (grossissement: 10X; largeur de la photo: 2mm); d) remplissage par la calcite de vides dans la veine Viborillas, (grossissement: 2.5X; largeur de la photo: 8mm); e) grain d'or entouré de tétrahédryte et de quartz dans la veine Terneras, (grossissement: 20X; largeur de la photo: 1mm); f) veinule de quartz qui recoupe la pyrite et la tétrahédrite dans la veine San Juanes, (grossissement: 2.5X; largeur de la photo: 8mm). PY = Pyrite; CH = Chalcopryrite; CO = Covellite; TH = Tétrahédrite; SP = Sphalérite; QZ = Quartz; CC = Calcite.

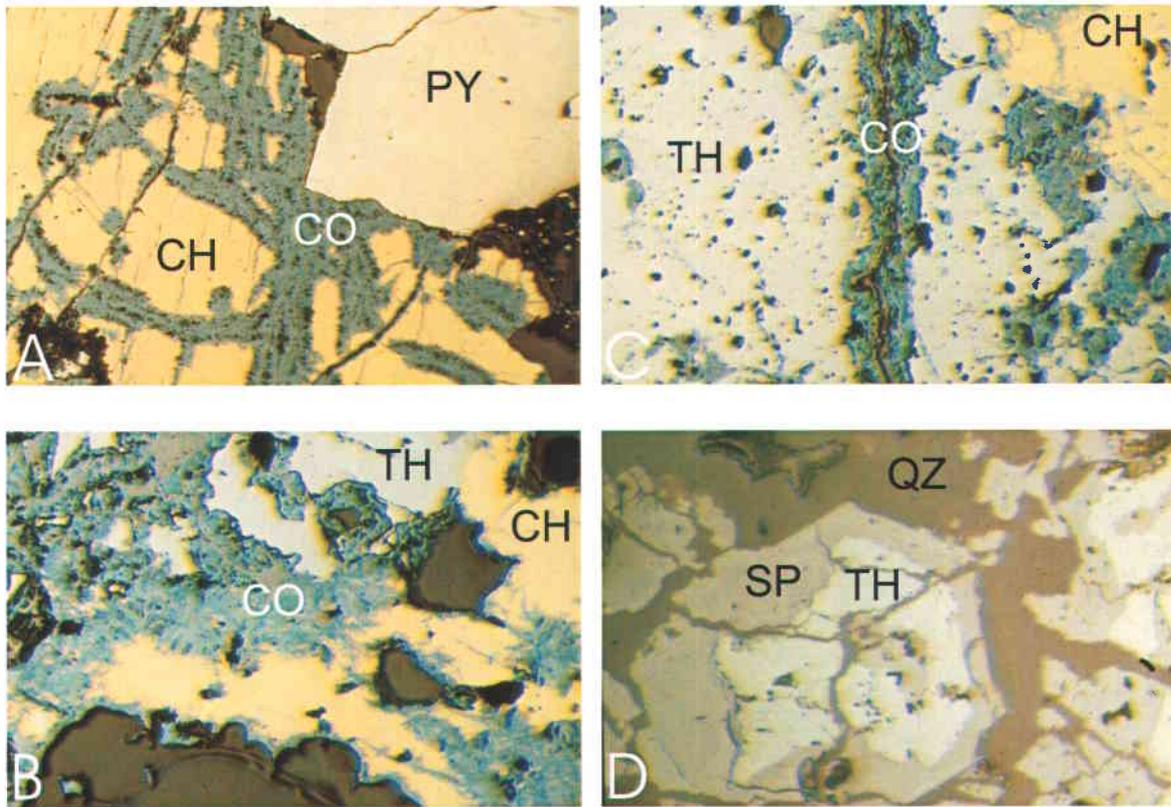


Planche 8: a) la covellite remplace la chalcopryrite mais pas la pyrite dans la veine San Juanes, (grossissement: 2.5X; largeur de la photo: 8mm); b) la covellite remplace la chalcopryrite et la tétrahédrite dans la veine San Juanes, (grossissement: 10X; largeur de la photo: 1.9mm); c) ici, la covellite remplace encore la tétrahédrite dans la veine San Juanes, (grossissement: 10X; largeur de la photo: 1,9mm); d) remplacement de la tétrahédrite par la sphalérite, le tout envahie par le quartz, dans la veine Viborillas (grossissement: 20X; largeur de la photo: 1mm). PY = Pyrite; CH = Chalcopryrite; CO = Covellite; TH = Tétrahédrite; SP = Sphalérite; QZ = Quartz.

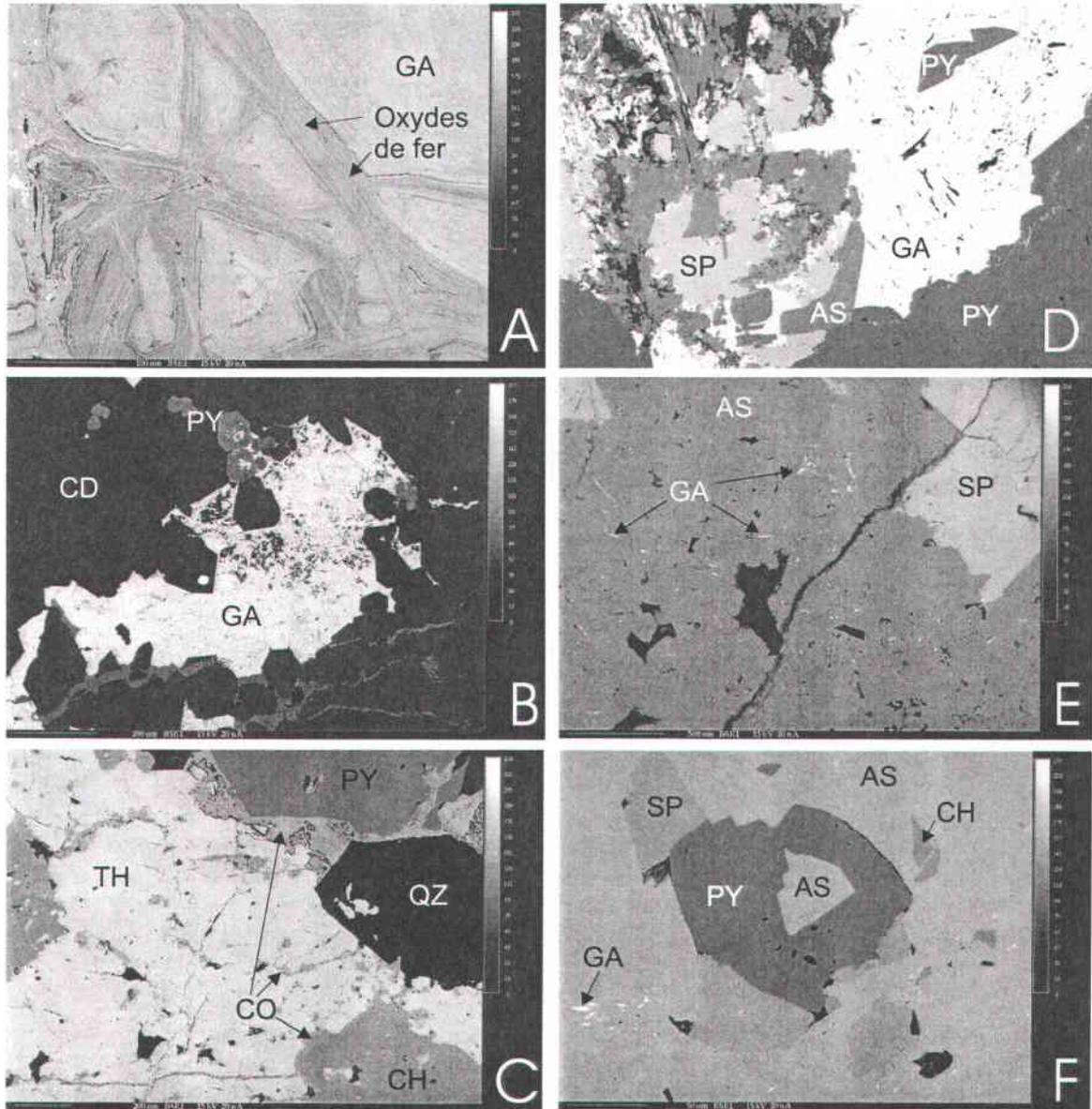


Planche 9: Les photos suivantes montres différentes lames mines observées à la micro sonde. Les échelles sont indiqué sur chaque image. a) Veine Santa Juana. Galène altéré, avec oxydes de fer ayant des concentration en silice variable; b) veine Ordenanza 1. Galène argentifère avec pyrite et calcédoine; c) veine San Juanes. Tétrahédrite argentifère (17018 ppm) avec covellite, chalcopyrite et pyrite; d) veine Santa Juana (largeur 600 µm). Galène argentifère (2740 ppm) avec pyrite, sphalérite et arsénopyrite; e) veine Santa Juana. Galème argentifère (entre 1502 ppm et 4348 ppm), arsénopyrite et sphalérite.; f) veine Santa Juana. Chalcopyrite -> Arsénopyrite -> Pyrite -> Sphalérite. PY = Pyrite; CH = Chalcopyrite; CO = Covellite; GA = Galène; TH = Tétrahédrite; SP = Sphalérite; AS = Arsénopyrite; QZ = Quartz; CD = Calcédoine.



Appendice B

Carte géologique de la propriété de la mine Velardeña (dans la pochette à la fin du présent document)



## Appendice C

Résultats microsonde pour une lame mince de la veine Santa Juana (2 premiers tableaux) et pour la veine San Juanes (dernier tableau)

point n	1	x=	-7982	y=	24578	z=	240			
STJ04 galène										
Elt.	Peak (Cps)	Prec (%)	Bkgd (Cps)	P/B	Ix/Istd	Sig/k (%)	Detection limit (%)	Beam (na)	Acceleration voltage (kV)	
Ag	463.1	0.7	228.8	2.02	0.01	-1	0.0102	100.3	15	
Elt.	k-ratio	Correc.								
Ag	0.0033	1.3168								
iteration : 2										
Analysis no. 33 within Silver										
Elt.	Conc. (wt%)	1sigma (wt%)	Norm Conc. (wt%)	Norm Conc. (at%)						
Ag	0.4348	0.008943	0.4329	0.4799						
Pb	86.6		86.2251	49.7593						
S	13.4		13.342	49.7608						
total	100.4348		100	100						
point n	2	x=	-8221	y=	24381	z=	240			
STJ04 galène										
Elt.	Peak (Cps)	Prec (%)	Bkgd (Cps)	P/B	Ix/Istd	Sig/k (%)	Detection limit (%)	Beam (na)	Acceleration voltage (kV)	
Ag	310.6	0.9	229.3	1.35	0.0035	-1	0.0101	100.6	15	
Elt.	k-ratio	Correc.								
Ag	0.0011	1.3143								
iteration : 2										
Analysis no. 34 within Silver										
Elt.	Conc. (wt%)	1sigma (wt%)	Norm Conc. (wt%)	Norm Conc. (at%)						
Ag	0.1502	0.008107	0.15	0.1663						
Pb	86.6		86.4701	49.9161						
S	13.4		13.3799	49.9176						
total	100.1502		100	100						

point n	1	x=	-4076	y=	-18423	z=	243			
<b>STJ02 galène 1</b>										
Elt.	Peak (Cps)	Prec (%)	Bkgd (Cps)	P/B	Ix/Istd	Sig/k (%)	Detection limit (%)	Beam (na)	Acceleration voltage (kV)	
Ag	374.1	0.8	227.2	1.65	0.0063	-1	0.0102	99.7	15	
Elt.	k-ratio	Correc.								
Ag	0.0021	1.3154								
iteration :	2									
Analysis no. 31 within Silver										
Elt.	Conc. (wt%)	1sigma (wt%)	Norm Conc. (wt%)	Norm Conc. (at%)						
Ag	0.274	0.008509	0.2733	0.303						
Pb	86.6		86.3633	49.8478						
S	13.4		13.3634	49.8493						
total	100.274		100	100						
point n	2	x=	-4468	y=	-18878	z=	246			
<b>STJ02 galène 2</b>										
Elt.	Peak (Cps)	Prec (%)	Bkgd (Cps)	P/B	Ix/Istd	Sig/k (%)	Detection limit (%)	Beam (na)	Acceleration voltage (kV)	
Ag	363.3	0.8	227.7	1.6	0.0058	-1	0.0102	99.9	15	
Elt.	k-ratio	Correc.								
Ag	0.0019	1.3152								
iteration :	2									
Analysis no. 32 within Silver										
Elt.	Conc. (wt%)	1sigma (wt%)	Norm Conc. (wt%)	Norm Conc. (at%)						
Ag	0.2523	0.008436	0.2517	0.2791						
Pb	86.6		86.382	49.8597						
S	13.4		13.3663	49.8612						
total	100.2523		100	100						

point n	1	x=	11080	y=	27060	z=	252		
<b>SJA-01 Tétrahédrite 1</b>									
Elt.	Peak (Cps)	Prec (%)	Bkgd (Cps)	P/B	Ix/Istd	Sig/k (%)	Detection limit (%)	Beam (na)	Acceleration voltage (kV)
Sb	5077.4	0.3	100.5	50.51	0.571	0.3	0.0466	20	15
Ag	228.6	1.5	31.7	7.21	0.0422	1.5	0.0422	20	15
S	6651.4	0.3	31.9	208.49	0.4523	0.3	0.0181	20	15
Fe	536.7	1	55.5	9.67	0.0482	1	0.0387	20	15
Cu	4210.1	0.3	93.9	44.82	1.1834	0.4	0.0729	20	15
Elt.	k-ratio	Correc.							
Sb	0.2249	1.2254							
Ag	0.0139	1.2211							
S	0.2294	1.0676							
Fe	0.0311	0.9704							
Cu	0.3692	1.0241							
iteration : 2									
Analysis no. 1 within Tétrahédi									
Elt.	Conc. (wt%)	1sigma (wt%)	Norm Conc. (wt%)	Norm Conc. (at%)					
Sb	27.5603	0.099026	29.138	13.6765					
Ag	1.7018	0.033208	1.7992	0.9532					
S	24.4902	0.076504	25.8921	46.152					
Fe	3.017	0.035909	3.1897	3.2639					
Cu	37.8162	0.162974	39.981	35.9543					
total	94.5854		100	100					



## LISTE DE RÉFÉRENCES

- AGUIRRE-DIAZ, G. et F.W. McDowell. 1991. «The volcanic section at Nazas, Durango, Mexico and the possibility of widespread Eocene volcanism within the Sierra Madre Occidental». Journal of Geophysical Research, v.96, p.13373-13388.
- AGUIRRE-DIAZ, G.J. and F.W. McDowell. 1993. «Nature and timing of faulting and synextensional magmatism in the southern Basin and Range, central-eastern Durango, Mexico». Geological Society of America Bulletin, vol.105, p.1435-1444.
- ALBINSON, T.F. 1988. «Geologic Reconstruction of Paleosurfaces in the Sombretete, Colorado, and Fresnillo Districts, Zacatecas State, Mexico». Economic Geology, vol.83, p.1647-1667.
- ALDRICH, M.J. Jr., C.E. Chapin et A.W. Laughlin. 1986. «Stress history and tectonic development of the Rio Grande rift, New Mexico». Journal of Geophysical Research, v.91, p.6199-6211.
- AMBRIZ, M.D. 1979. «Geología y yacimientos minerales de la Mina Santa Maria en Velardeña, Durango». 13th Convencion Nacional de la Asociación de Ingenieros de Minas. Metalurgistas y Geólogos de México, Memorias, p.225-260.
- AMCOFF, Ö. 1976. «The solubility of silver and antimony in galena». N. Jb. Miner. Mh. vol.6, p.247-261.
- ANGELIER, J. 1984. «Tectonic Analysis of Fault slip data sets». Journal of Geophysical Research, v.89, no.B7, p.5835-5848.
- ANGELIER, J. 1989. «From orientation to magnitudes in paleostress determinations using fault slip data». Journal of Structural Geology, v.11, p.37-50.
- ARANDA-GÓMEZ, J.J., C.D. Henry, J.F. Luhr et E.W. McDowell. 1997. «Cenozoic volcanism and tectonics in NW Mexico – A transect across the Sierra Madre Occidental volcanic field and observations on extension related magmatism in the southern Basin and Range and Gulf of California tectonic provinces in Aguirre-Diaz, G.J., J.J. Aranda-Gómez, G. Carrasco-Nunez et L. Ferrara, eds. Magmatism and tectonics in the central and northwestern Mexico – A selection of the 1997 IAVECI General Assembly excursions». Universidad Nacional Autonoma de Mexico, D.F. Excursion 11, p.41-84.
- CAMPA, M.F. et P.J. Coney. 1984. «Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distribution in Mexico». Canadian Journal Earth Sciences, vol.20, p.1040-1051.
- CHAMBERLIN, R.M. 1983. «Cenozoic domino-style crustal extension in the Lemitar Mountains, New Mexico: A summary». New Mexico Geological Society 34<sup>th</sup> Field Conference Guidebook, p.111-118.

- CLARK, K.F., P.E. Damon, S.R. Schuffer et M. Shafiqullah. 1979. «Magmatismo en el norte de México en relación a los yacimientos metalíferos». Asoc. Ingenieros Minas, Metalurgistas Geólogos México, Convención Nac. XIII, Acapulco, Mem. P.8-57.
- CLARKE, M. et S.P. Titley. 1988. «Hydrothermal Evolution in the Formation of Silver-Gold Veins in the Tayoltita Mine, San Dimas District, Mexico». Economic Geology, vol.83, p.1830-1840.
- CONRAD, M.E. U. Petersen et J.R. W'Neil. 1992. «Evolution of an Au-Ag-Producing Hydrothermal System: The Tayoltita Mine, Durango, Mexico». Economic Geology, vol.87, p.1451-1473
- FELDER, F. 1979. «Eudio de algunas Eructuras mineralizadas en el domo de Santa Maria, Velardeña, Durango». Asos. Ingenieros Minas Metalurgistas Geólogos Mexico, Convención Nac. XIII. Acapulco, Mem. p.192-224.
- FOLEY, N., K. Bethke, P.M. et R.O. Rye. 1989. «A reinterpretation of the  $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$  of inclusion fluids in contemporaneous quartz and sphalérite, Creede mining district. Colorado: A generic problem for shallow orebodies?». ECONOMIC GEOLOGY, vol.84, p.1966-1977.
- GEMMELL, J.B., S.F. Simmons et H. Zantop. 1988. «The Santo Niño Silver-Lead-Zinc Vein, Fresnillo District, Zacatecas, Mexico: Part I. Structure, Vein Stratigraphy and Mineralogy». Economic Geology, vol.83, p.1597-1618.
- GILMER, A.L., K.F. Clark, C.I. Hernandez, C.J. Conde et S.J.I. Figueroa. 1986. «Geological and mineralogical summary of the metalliferous deposits in the Santa Maria dome, Velardeña, Durango, *in* Clark, K.F., P.K.M. Megaw et J. Ruiz, eds., Lead-zinc silver carbonate hosted deposits of northern Mexico: El Paso, Texas». Univ. Texas El Paso. Soc. Econ. Geologists Guidebook, p.143-153.
- GILMER, A.L. et V.M. Harder. 1987. «Dating of hydrothermal events and implications upon fluid evolution via fluorite fission track dating, K-Ar dating, and fluid inclusion analyses within the Santa Maria dome, Velardeña, Durango, Mexico [abs.]». American Current Research Fluid Inclusions, Program and Abstracts, 35p.
- GILMER, A.L., K.F. Clark, J. Conde C., I. Hernandez C., J.I. Figueroa S. et E.W. Porter. 1988. «Sierra de Santa Maria, Velardeña Mining District, Durango, Mexico». Economic Geology, vol.83, p.1802-1829.
- GOODELL, P.C. et U. Petersen. 1974. «Julcani mining district, Peru : A study of metal ratios». Economic Geology, v.69, p.347-361.
- GRANT, G.J., et J. Ruiz. 1988. «The Pb-Zn-Cu-Ag deposits of the Granada mine, San Francisco del Oro-Santa Barbara district, Chihuahua, Mexico». Economic Geology, vol.83, p.1683-1702.
- GRIGOR'EV, D.P. 1961. «Ontogeny of minerals: Jerusalem, Israel». Program for Scientific Translations Ltd (1965). 250p.

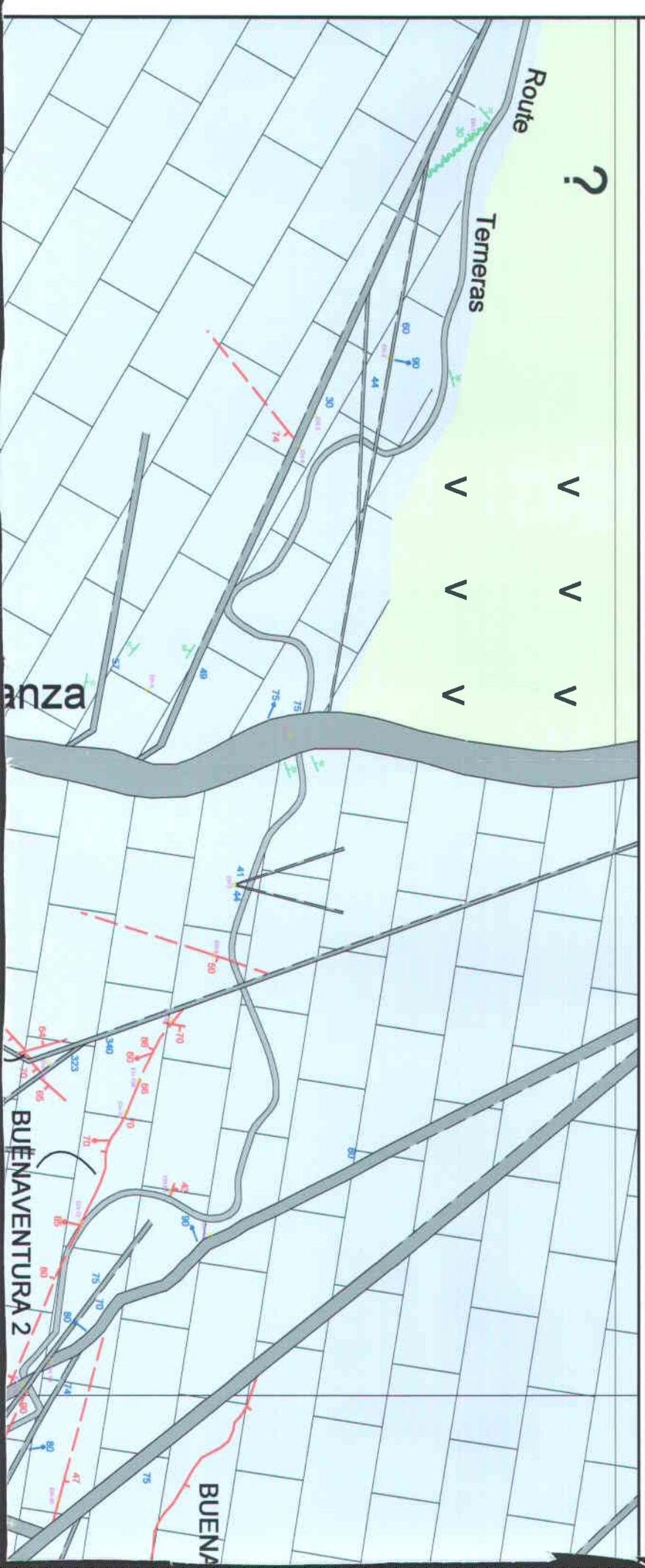
- GROSS, W.H. 1975. «New Ore Discovery and Source of Silver-Gold Veins, Guanajuato Mexico». Economic Geology, vol.70, p.1175-1189.
- HEALD, P., N.K. Foley et D.W. Hayba. 1987. «Comparative Anatomy of Volcanic-Hosted Epithermal Deposits: Acid-Sulfate and Adularia-Sericite Types». Economic Geology, vol.82, p.1-26.
- HENLEY, R.W. et D.P.M. Adams. 1992. «Strike-slip fault reactivation as a control on epithermal vein-style gold mineralization». Geology, vol.20, p.443-446.
- HENRY, C.D. 1975. «Geology and geochronology of the granitic batholith complex, Sinaloa, Mexico»: Ph.D. thesis, Austin, Univ. Texas, 158 p.
- HENRY, C.D. 1989. «Late Cenozoic Basin and Range structure in Western Mexico adjacent to the Gulf of California». Geological Society of America Bulletin, vol.101, p.1147-1156.
- HENRY, C.D., J.G. Price et E.W. James. 1991. «Mid-Cenozoic stress evolution and magmatism in the southern Cordillera, Texas and Mexico: Transition from continental arc to intraplate extension». Journal of Geophysical Research, v.96, p.13545-13560.
- HENRY, C.D. et J.J. Aranda-Gomez. 1992. «The real southern Basin and Range: Mid-to late Cenozoic extension in Mexico». Geology, vol.20, p.701-704.
- HENRY, C.D. et J.J. Aranda-Gomez. 2000. «Plate interactions control middle-late Miocene, proto-Gulf and Basin and Range extension in the southern Basin and Range». Tectonophysics, vol.318, p.1-26.
- HERNÁNDEZ, C.I. 1991. Economic Geology of the Velardeña Mining District, Durango, Colorado: The Geology of North America, vol. P-3, p.269-278.
- HICKMAN, S., R. Sibson et R. Bruhn. 1995. «Introduction to special section: Mechanical involvement of fluids in faulting». Journal of Geophysical Research, vol.100, p.12,831-12,840.
- IMLAY, R.W. 1937. «Geology of the middle part of the Sierra de Parras, Coahuila, Mexico». Geological Society of America Bulletin, v.48, p.587-630.
- KOCH, G.S. et R.F. Link. 1967. «Geometry of metal distribution in five veins of the Fresnillo mine, Zacatecas, Mexico: U.S. Bur. Mines». Report of Investigations 6919, p.1-64.
- KNOWLING, R.D. 1976. «Geology and mineralization of the Ocampo district, Chihuahua, Mexico». Geological Society of America Abstracts with Programs, v.8, 596 p.
- LANG, B., G. Steinitz, F.J. Sawkins et S.F. Simmons. 1988. «K/Ar age studies in the Fresnillo silver district, Zacatecas, Mexico». Economic Geology v.83, p.1642-1646.
- LEVICH, R.A. 1973. «Geology and ore deposits of the Sierra de Santa Maria, Velardeña, Durango, Mexico»: Unpub. M.S. thesis, Austin, Univ. Texas, 148 p.

- LOUCKS, R.R., J. Lemish et P.E. Damon. 1988. «Polymetallic Epithermal Fissure Vein Mineralization, Topia, Durango, Mexico: Part I. District Geology, Geochronology, Hydrothermal Alteration, and Vein Mineralogy». Economic Geology, vol.83, p.1499-1528.
- LYONS, J.I. 1988. «Geology and Ore Deposits of the Bolaños Silver District, Jalisco, Mexico». Economic Geology, vol.83, p.1560-1582.
- MALDONADO ESPINOSA, D. et P.K.M. Megaw. 1983. «Geology of the Santa Eulalia mining district, Chihuahua, Mexico in Geology and mineral resources of north-central Chihuahua, El Paso, Texas». El Paso Geological Society, p.367-376.
- MCDOWELL, F.W. et S.E. Clabaugh. 1972. «Edades potasioargon de rocas volcanicas en la Sierra Madre Occidental, al noreste de Mazatlan [abs.]». Soc. Geol. Mexicana Conf. Nac. 2<sup>nd</sup>, Mazatlan, Mem., p.182-185.
- MCDOWELL, F.W. et R.P. Kaizer. 1977. «Timing of mid-Tertiary volcanism in the Sierra Madre Occidental between Durango City and Mazatlan, Mexico». Geological Society of America Bulletin, v.88, p.1479-1486.
- MCKEE, E.H., J.E. Dreier et D.C. Noble. 1992. «Early Miocene Hydrothermal activity at Pachuca-Real Del Monte, Mexico: an example of space-time association of volcanism and epithermal Ag-Au vein mineralization». Economic Geology, vol.87, 1635-1637.
- MCLEROY, D.F., Clemons, R.E. 1966. Hoja Pedricenas, 13R-1 (4): Univ. Nac. Autonoma Mexico, Inst. Geologia, Carta Geol. Ser., 1:100,000.
- PARK, A.M. et R.A. MacDiarmid. 1970. «Ore deposits: San Francisco». W.H. Freeman Co., p.183-185.
- PINET, N. 1999. Geology of the Velardeña property: Part 2: Geology study of the Velardeña mine. Québec: Progress report.
- PONCE, B.F. et K.F. Clark. 1988. «The Zacatecas mining district: a tertiary caldera complex associated with precious and base metal mineralization». Economic Geology, vol.83, p.1668-1682.
- RAMDOHR, P. 1969. The Ore minerals and their intergrowths. Permagon, New York: 1174 p.
- SALAS, G.P. 1975. «Carta y provincias metalogeneticas de la Republica Mexicana». Consejo Recursos Minerales, Publicacion 21<sup>E</sup>, 242p.
- SALAS, G.P. 1991. «Economic geology, Mexico». Geology of North America. vol. P-3, 438p.
- SANTILLAN, M. 1936. «Carta geologico-minera del Estado de Durango»: Univ. Nac. Autonoma Mexico, Inst. Geologica Mexico, Carta Geologico y Minas 2, 162p.

- SCHEUBEL, F.R., K.F. Clark et E.W. Porter. 1988. «Geology, Tectonic Environment and Structural Controls in the San Martin de Bolaños District, Jalisco, Mexico». Economic Geology, vol.83, p.1703-1720.
- SIMMONS, S.F. 1991. «Hydrologic Implications of Alteration and Fluid Inclusion Studies in the Fresnillo District, Mexico: Evidence for a Brine Reservoir and a Descending Water Table during the Formation of Hydrothermal Ag-Pb-Zn Orebodies». Economic Geology, p.1579-1599.
- SMITH, D.M. Jr., T. Albinson et F.J. Sawkins. 1982. «Geologic and Fluid Inclusion Studies of the Tayoltita Silver-Gold Vein Deposit, Durango Mexico». Economic Geology, vol.77, p.1120-1145.
- SPURR, J.E. et Garrey, G.H. 1908. «Ore deposits of the Velardeña district, Mexico». Economic Geology, vol.39, p.688-725.
- SPURR, J.E. 1923. The Ore Magmas. McGraw-Hill.
- STAUDE, J-M.G. et M.D. Barton. 2001. «Jurassic to Holocene tectonics, magmatism, and metallogeny of northwestern Mexico». Economic Geology, vol.113, p.1357-1374.
- STEWART, J.A. 1978. «Basin-range structure in western North America, a review *in* Smith, R.B. et G.P. Eaton, eds. Cenozoic tectonics and regional geophysics of the western Cordillera». Geological Society of America Memoir 152, p.1-13.
- SUTER, M., M. Carillo-Martínez, M. López-Martínez et E. Farrar. 1995. «The Aljibes half-graben-Active extension at the boundary between the trans-Mexican volcanic belt and the Basin and Range Province, Mexico». GSA Bulletin, vol.107, p.627-641.
- SWANSON, E.R., R.P. Keizer, J.I. Lyons et S.E. Clabaugh. 1978. «Tertiary volcanism and caldera development near Durango City, Sierra Madre Occidental, Mexico». Geol. Soc. Am. Bull. 89, p.1000-1012.
- TARDY, M. 1980. «Contribution à l'étude géologique de la Sierra Madre oriental du Mexique». Thèse du doctorat d'état, Université de Paris, 445p.
- TAYLOR, H.P. 1973. « $O^{18}/O^{16}$  evidence for meteoric-hydrothermal alteration and ore deposition in the Tonopah, Comstock Lode, and Goldfield mining districts, Nevada» Economic Geology, vol.68, p.747-764.
- WEISS, D.I. E.H. McKee, D.C. Noble, K.A. Connors et M.R. Jackson. 1991. «Multiple episodes of Au-Ag mineralization in the Bullfrog Hills, SW Nevada, and their relation to coeval extension and volcanism [abs.]». Geol. Soc. America Abstracts with Programs, v.23, p.A246.
- WISSER, E. 1966. «The epithermal precious metal province of northwest Mexico». Nevada Bur. Mines, 13 pt. C, p.63-92.
- WRIGHT, F.E. 1908. «On Three Contact Minerals from Velardeña, Durango, Mexico, (Gehlenite, Spurrite and Hillebrandite)». The American Journal of Science, vol.26, p.545-554.

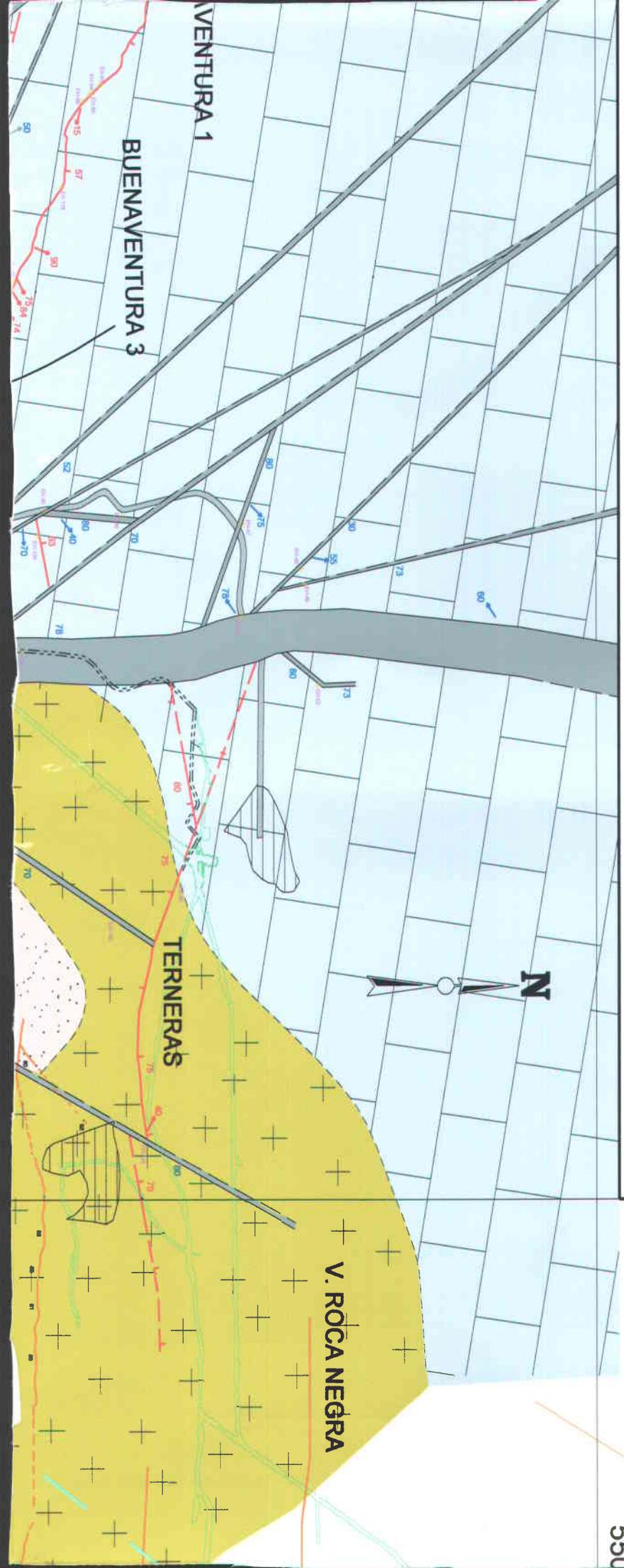
# Géologie de la région de

Cartographie et Interprétation : E. Hoffmann et



# de la mine Velardeña

A. Tremblay (INRS-Géoresources)



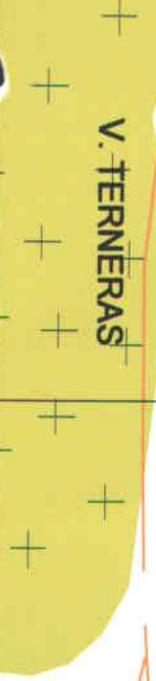
SANTA JUANA

9500 E

3 AGUILAS FAULT

NON

V. TERNERAS



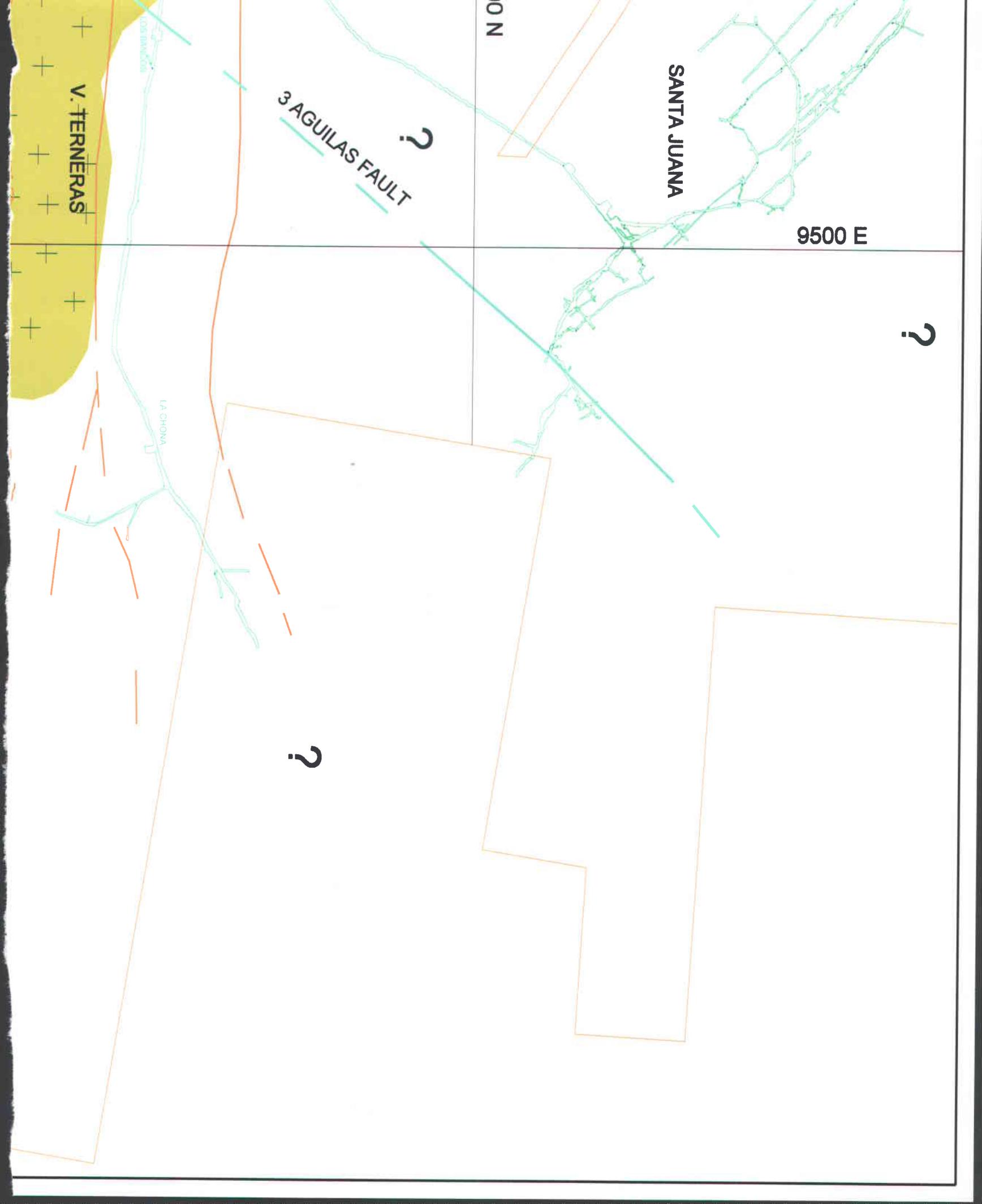
LOS BARRILES

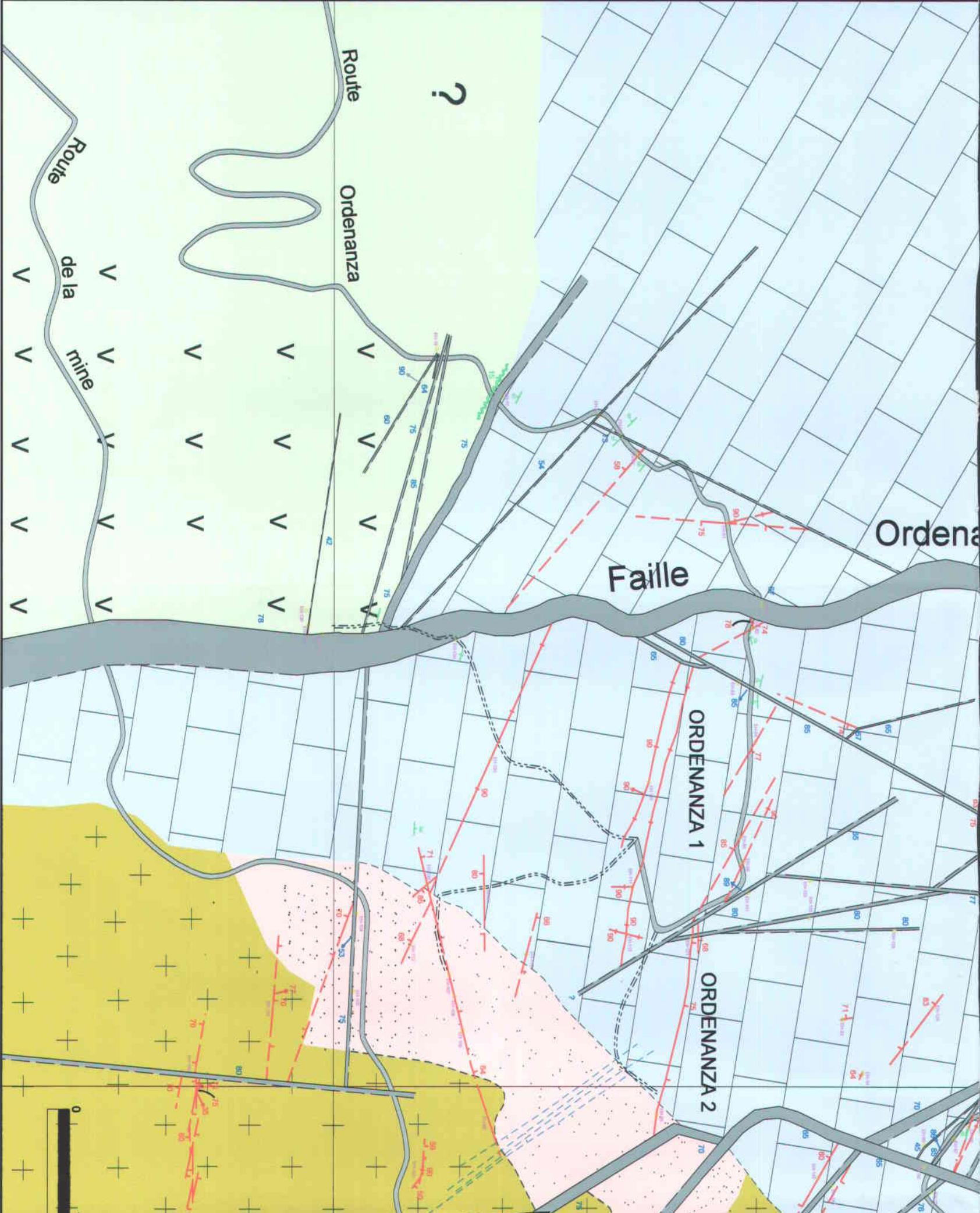
LA CHOMA

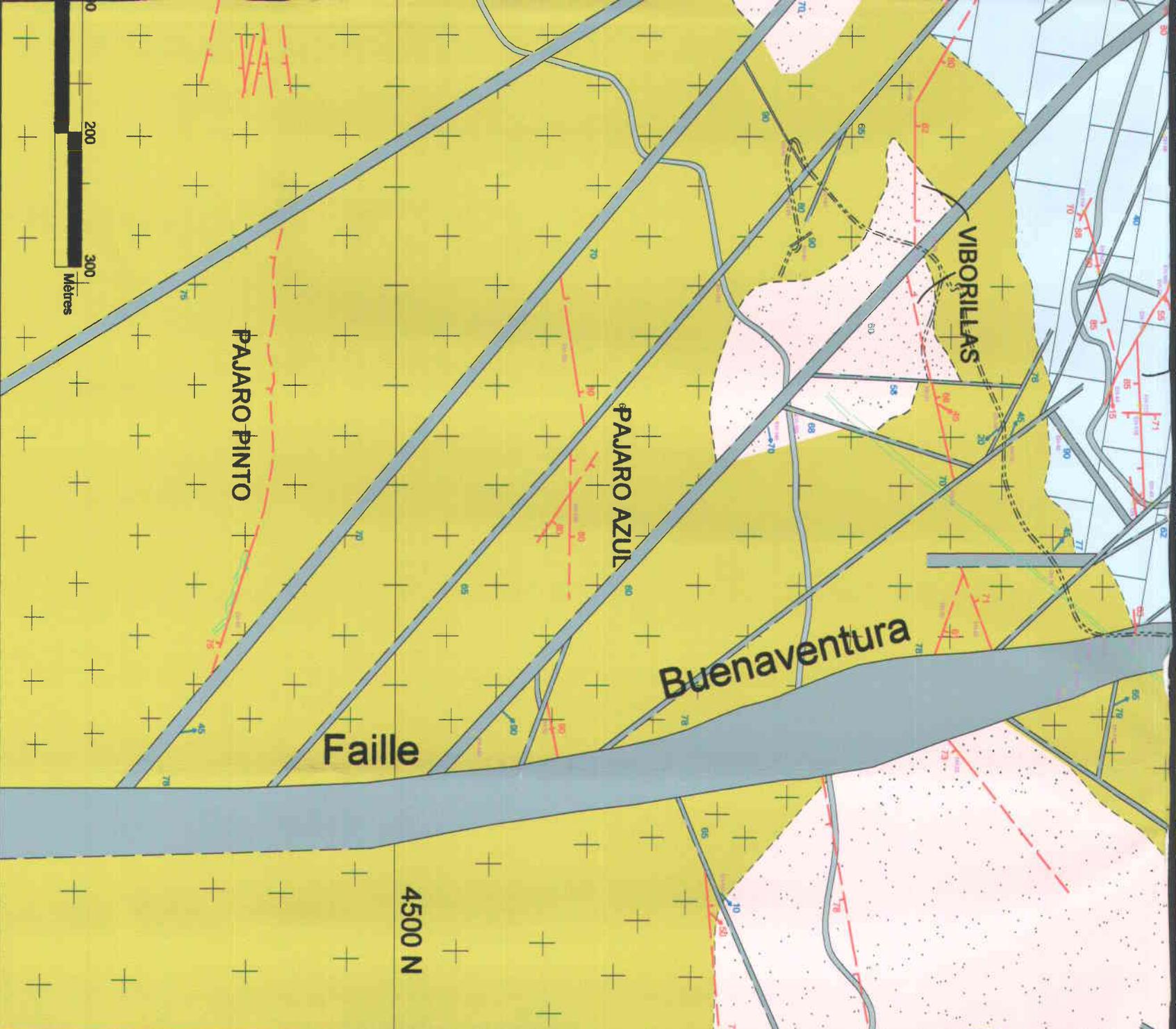
?

?

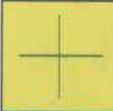
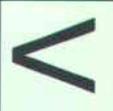
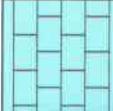
?





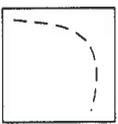


# Lithologie

-  Skarn
-  Diorite
-  R. volcanique
-  Calcaire

# LÉGENDE

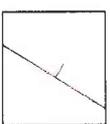
## Symboles Structuraux Autres Symboles



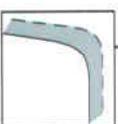
Contact lithologique



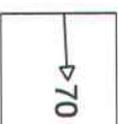
Cartographie pré-existante



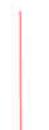
Veine

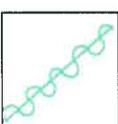


Faïlle

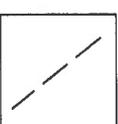


Stries (angle de chute)

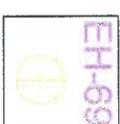
 : **sur veines**  
 : **sur failles**



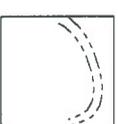
Discordance



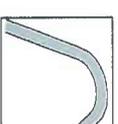
Cisaillement local



# Station



Piste



Route



Travaux sous-terrains (galeries et chantiers)

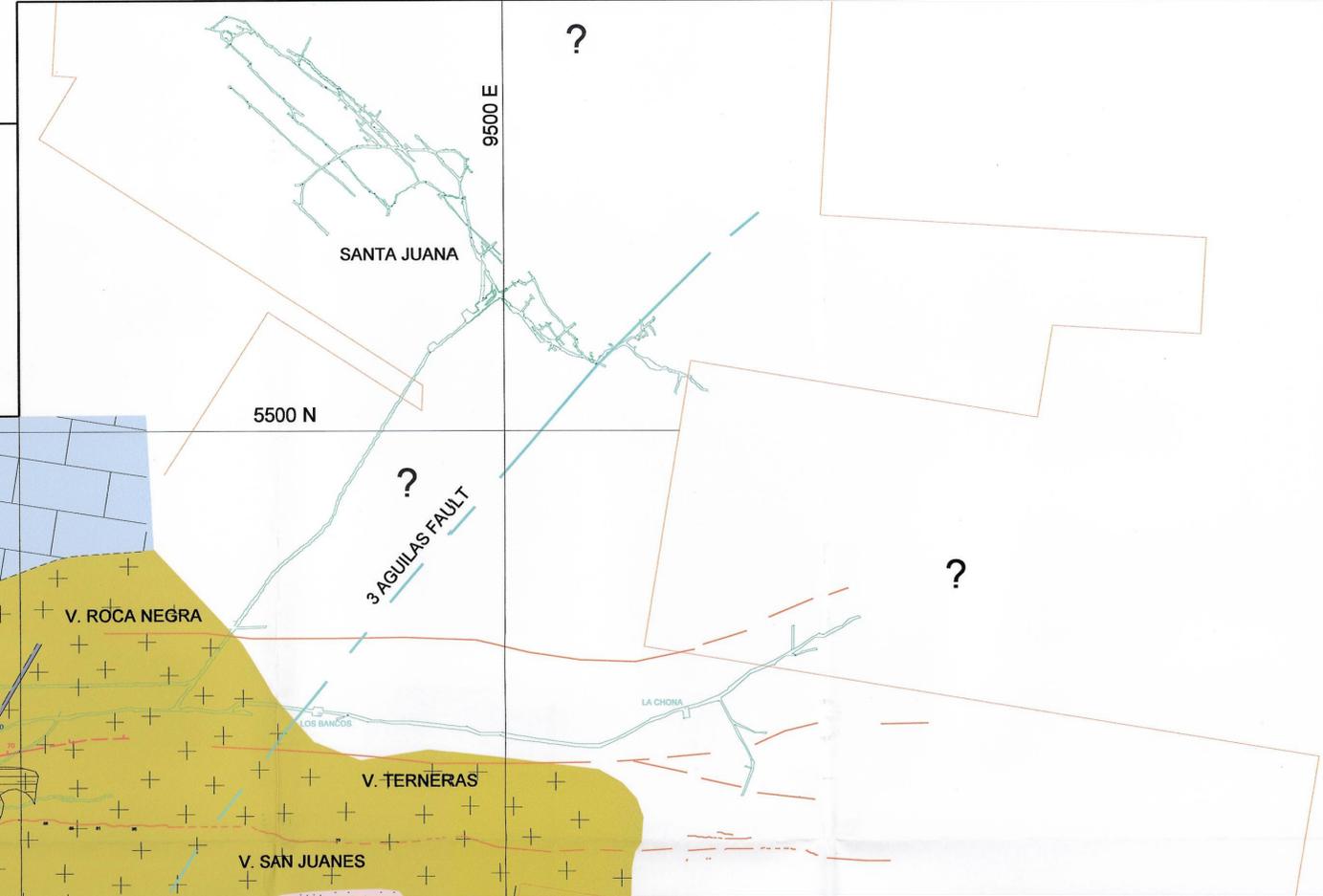


Litage (So)

felsique

# Géologie de la région de la mine Velardeña

Cartographie et Interprétation : E. Hoffmann et A. Tremblay (INRS-Géoresources)



## LÉGENDE

### Symboles Structuraux Autres Symboles

- |  |                            |  |   |
|--|----------------------------|--|---|
|  | Contact lithologique       |  | # Station                                     |
|  | Cartographie pré-existante |  | Piste   |
|  | Veine                      |  | Route   |
|  | Faille                     |  | Travaux sous-terrains (galeries et chantiers) |
|  | Stries (angle de chute)    |  |   |
|  | sur veines                 |  |   |
|  | sur failles                |  |   |
|  | Discordance                |  |   |
|  | Cisaillement local         |  |   |
|  | Litage (So)                |  |   |

### Lithologie

- Skarn
- Diorite
- R. volcanique felsique
- Calcaire

NOTE: modifié de la carte de BLM au 1:10,000 (version 26/01/99)