



Ministère de l'Economie,
des Finances et
de l'Industrie

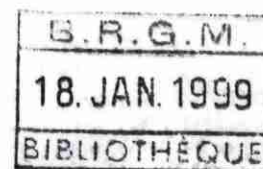


DOCUMENT PUBLIC

*Appui aux administrations, aux archéologues et
aux collectivités
pour les procédures d'abandon de concessions
minières et leur revalorisation touristique
en Région Provence-Alpes-Côte d'Azur
Rapport de la campagne 1998*

Étude réalisée dans le cadre des actions de Service public du BRGM 98-G-502

décembre 1998
R 40408



Mots clés : Mines, Analyse structurale, Schistosité, Phases tectoniques, Nappes, Zone Briançonnaise, Provence cristalline, Socle, Trias inférieur, Jurassique, Métallogénie, Gîtologie, Alpes, Filon, Plomb, Zinc, Barytine, Fluorine, Hautes-Alpes, Var, Appui aux administrations, Procédure administrative, Concessions minières, Déprise minière, Patrimoine, Culture, Archéologie, Muséologie, Tourisme, Géoparc, Aménagement du territoire.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

BRGM (1998) - Appui aux administrations, aux archéologues et aux collectivités pour les procédures d'abandon de concessions minières et leur revalorisation touristique en Région Provence-Alpes-Côte d'Azur : rapport de la campagne 1998. Rapp. BRGM R 40408, 71 p., 10 fig., 2 tabl., 14 photos.

© BRGM, 1998, ce document ne peut être reproduit en totalité ou partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, les administrations respectivement en charge des travaux sécuritaires sur les concessions minières orphelines et des fouilles de sauvetage archéologique sur ces sites miniers parfois chargés d'histoire, pilotent depuis 1997 une étude du BRGM en appui aux archéologues miniers des Hautes-Alpes et du Var, dans le cadre des opérations de Service public n° 97-G-502 puis 98-G-502. Le présent rapport rend compte de la campagne 1998.

La contribution du BRGM a consisté à donner un conseil d'expert sur la sécurité en mine, à transférer aux archéologues miniers des techniques de levé géologique et à continuer à fournir une documentation spécialisée inédite. En particulier aussi, deux nouvelles études géologiques spécifiques ont été réalisées sur l'ancienne mine de plomb argentifère de l'Argentière-la-Bessée, l'une consistant en un complément à l'analyse structurale de 1997, et l'autre en une étude de laboratoire sur la minéralogie du minerai et sa composition chimique. Outre leur objectif scientifique pur, ces études ont continué à cerner la valeur ajoutée patrimoniale exceptionnelle apportée par certaines caractéristiques géologiques de ces sites déjà éminemment touristiques.

Comme en 1997, les résultats obtenus par la collaboration BRGM-CCSTI, relayée par le comité de pilotage DRAC-DRIRE, sont assez exemplaires du travail collectif qui peut être réalisé entre l'Etat (représenté par deux de ses services), un établissement public (le BRGM), l'Université, et des collectivités territoriales (X. Guthertz et H. Barge, 1998). Ce travail en effet, réalisé dans le contexte de la déprise minière et des procédures d'abandon, démontre la faisabilité d'une prise en compte globale des impératifs techniques de sécurité et des impératifs patrimoniaux dans une triple perspective de réaménagement du territoire, de restitution au public de son histoire et de développement économique et touristique.

C'est pourquoi la campagne 1998 comportait aussi une recherche de cofinancements et de partenariats dont il a été rendu compte au comité de pilotage du projet par ailleurs.

Sommaire

Introduction	9
1. Expertises pour la sécurité de chantiers de fouilles, recommandation des travaux sécuritaires les plus impératifs	11
1.1. Sécurité de fouilles en galerie sur l'ancienne concession pour plomb, zinc de Valaury (Var)	11
1.1.1. Filons n° 1 et n° 2 (= groupe filonien du Puits Victor)	11
1.1.2. Filon n° 3 ou filon Bérenguier	14
1.1.3. Filon n° 8	15
1.1.4. Filon n° 7	16
1.1.5. Filon n° 5	16
1.1.6. Conclusion	16
1.2. Sécurité de fouilles en galerie sur l'ancienne concession pour fer de Lagnes (Vaucluse) ..	17
1.3. Conclusion des expertises sécuritaires de fouilles	19
1.3.1. Risques inhérents à la fréquentation du milieu souterrain et globalement à l'exercice de la spéléologie minière	19
1.3.2. Risques spécifiques liés aux parties d'ouvrages signalées comme dangereuses même pour les professionnels	20
2. Complément à l'étude structurale du gîte du Fournel	21
2.1. Description des principales observations effectuées	21
2.1.1. Quartier de Saint-Roch	21
2.1.2. Quartier de Rebaisse – Vieux Travaux	23
2.1.3. Galerie en rive droite du torrent du Fournel	27
2.1.4. Observations au jour de la rive droite du torrent du Fournel	27
2.2. Interprétation des résultats	30
2.2.1. Situation chronologique des minéralisations	30
2.2.2. Géométrie des ensembles géologiques	31
2.3. Nouvelles conclusions de l'étude structurale	31

3. Analyse chimique des minerais du Fournel	33
3.1. Conditions d'échantillonnage.....	33
3.2. Situation des échantillons analysés	33
3.3. Commentaires.....	36
4. Etude minéralogique en laboratoire du minerai du Fournel et de sa gangue	37
4.1. Etude du minerai.....	37
4.2. Description pétrographique des lames minces de gangue.....	38
5. Listage des études nécessaires et des perspectives de partenariats	41
5.1. Listage des études restant nécessaires.....	41
5.1.1. Travaux de géologie régionale.....	41
5.1.2. Travaux de modélisation géométrique en 3 dimensions (mine de Saint-Véran, mine du Fournel). Réalisation d'un bloc diagramme 3-D informatisé pour kiosque	42
5.1.3. Relevés géophysiques à Saint-Véran pour recherche de galerie et interprétation	44
5.1.4. Essais en laboratoire et bio-traitement de Saint-Véran	
5.2. Listage des partenariats envisageables.....	46
Conclusion	49
Bibliographie.....	51

Liste des figures

- Fig. 1 - Galerie obturée par le système de barres (tubes aciers remplis de béton)..... 12
- Fig. 2 - Système de fermeture par barre coulissant 12
- Fig. 3 - Plan et coupes de la mine du Pieï, Lagnes et recommandations 18
- Fig. 4 - Mine du Fournel, Quartier Saint-Roch, plan des Travaux Modernes : relevés structuraux (topographie et géologie par Dufour et Poulain, vers 1960)22
- Fig. 5 - Quartier Saint-Roch, plan des Anciens Travaux : relevés structuraux (topographie par B. Ancel, CCSTI).....24
- Fig. 6 - Carte de la zone de Rebaisse aux Vieux Travaux : relevés structuraux (topographie par B. Ancel, CCSTI).....25
- Fig. 7 - Carte et coupe longitudinale de la Galerie Rive Droite (du torrent du Fournel) : relevés structuraux (topographie par B. Ancel, CCSTI)28
- Fig. 8 - Carte de la rive droite du torrent du Fournel : relevés structuraux (topographie par B. Ancel, CCSTI).....29
- Fig. 9 - Echantillonnage au Fournel (Salle des Roues) : croquis en coupe transversale montrant le plan d'échantillonnage par grab sampling du pilier minéralisé35
- Fig. 10 - Echantillonnage au Fournel (Galerie Saint-Roch, Branche du Toit, travaux modernes recoupant les travaux médiévaux) : croquis en coupe transversale montrant le plan d'échantillonnage par grab sampling du pilier minéralisé35

Liste des photographies (mine du Fournel)

Ph. 1 - Mine du Fournel, veine minéralisée et faillée (station n° 49 B, Travaux Saint-Roch).....	54
Ph. 2 - Veine minéralisée : galène et quartz (station n° 48, Saint-Roch)	54
Ph. 3 - Stratification des quartzites, ayant (re)joué en cisaillement dextre (fentes à quartz, en échelon). Plancher de galerie montante (station n°49 A, Saint-Roch).....	55
Ph. 4, 5 et 6 - Vues de la veine minéralisée (Q + Ga) et faillée (stations n° 54 A, B et C, Saint-Roch).....	56
Ph. 7 - Veine minéralisée (Q + Ga) recoupée et décalée par une petite faille tardive ramifiée (station n°54 D, Saint-Roch).....	57
Ph. 8 - Faille N-S subverticale (cascade) affectant les bancs de quartzites à schistosité de fracture fruste (station n° 87 B, rive droite du torrent du Fournel).....	58
Ph. 9 - Veines à pyrite, N-S subverticales (station n° 98, rive droite du torrent du Fournel).....	59
Ph. 10, 11 et 12 - Vues du nord-est, du nord puis du nord-ouest d'une petite veine à pyrite, décalée par des failles NNW-SSE dextres (station n° 95, rive droite du torrent du Fournel).....	60
Ph. 13 et 14 - Veine à galène et quartz, peu inclinée et affectée par une faille parallèle (station n° 100, rive droite du torrent du Fournel).....	61

Liste des tableaux

Tabl.1 - Campagne d'échantillonnage à la mine du Fournel, analyses chimiques et déterminations minéralogiques et pétrographiques	34
Tabl. 2 - Mine du Fournel, paragenèses des échantillons observés.....	38

Liste des annexes

Annexe 1 - Tableau des analyses chimiques (mine du Fournel)	63
Annexe 2 - Visualiseur VRML : exemple de visualisation 3D d'une mine Souterraine.....	71

Introduction

La présente étude du Service Géologique Régional Provence-Alpes-Côte d'Azur du BRGM a été effectuée à la demande conjointe de la Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement (DRIRE) et de la Direction Régionale des Affaires Culturelles (DRAC) de Provence-Alpes-Côte-d'Azur, dans le cadre de la fiche programme de Service public du BRGM pluriannuelle n° 98-G-502 intitulée "Appui aux administrations, aux archéologues miniers et aux collectivités pour les procédures d'abandon de concessions minières en région PACA" et en liaison avec le Centre de Culture Scientifique, Technique et Industrielle (CCSTI) de l'Argentière-la-Bessée.

Depuis 1992, l'ensemble des concessions orphelines et assimilées de la Région ont été auditées au plan sécuritaire dans le cadre des programmes de Service public du BRGM lancés par la DRIRE. Mais ces audits étaient limités à un recensement des travaux sécuritaires à entreprendre sur les *orifices* des ouvrages (porches de galeries, têtes de puits, etc.). L'intérêt éventuel des collectivités pour un transfert de certains ouvrages sous leur responsabilité a été noté. En revanche, la question n'avait pas été abordée, dans ces rapports, d'évaluer la solidité résiduelle des ouvrages eux-mêmes ni de dimensionner des travaux de confortement des galeries pour permettre aux fouilles d'évaluation patrimoniale prévues dans le Code Minier de s'y dérouler en sécurité. En outre, en appui à ces fouilles de sauvetage archéologique, le besoin d'études géologiques se faisait sentir.

Cadre

Les experts de la DRAC ayant examiné l'intérêt patrimonial de chaque site ont remis à la DRIRE la liste des sites où des fouilles archéologiques complémentaires s'avéraient nécessaires dans le cadre de la procédure d'abandon.

Objectif de l'opération

En 1998 comme l'année précédente, l'opération a consisté en un appui aux études de la DRAC dans le cadre des procédures d'abandon en cours. L'esprit de ces études a été souligné dans l'article.

Contenu de l'opération

Les travaux de la campagne se sont articulés en six activités :

- **Documentation** - On a continué à fournir au CCSTI copie de la documentation minière régionale ou transrégionale souvent inédite accumulée dans les différents fonds documentaires du BRGM, dont certains ne sont pas encore dans une forme

permettant leur connaissance et encore moins leur consultation par le public (rapports internes anciennement non publics et archives souvent en exemplaire unique, cf. le rapport R39901 de décembre 1998).

- **Expertise pour la sécurité de chantiers de fouilles, recommandation des travaux sécuritaires les plus impératifs.**
- **Complément à l'étude structurale du gîte du Fournel.**
- **Analyses chimiques des minerais du Fournel.**
- **Etude minéralogique en laboratoire du minerai du Fournel et de sa gangue.**
- **Listage des études nécessaires et des perspectives de partenariats.**

1. Expertises pour la sécurité de chantiers de fouilles, recommandation des travaux sécuritaires les plus impératifs

Un chef-mineur du BRGM s'est rendu à Plan-de-la-Tour et à Lagnes du 21 au 23 juillet 1998.

La mission assignée au BRGM était d'abord de diagnostiquer la solidité de ces ouvrages et d'évaluer les risques encourus par les archéologues, soit à les parcourir, soit à y séjourner pour des relevés fins ou des visites guidées éventuelles. Il s'agissait ensuite, pour ceux de ces ouvrages qui présentent un danger, d'assister la DRAC dans l'établissement et le chiffrage de projets de travaux miniers légers de confortement ou de réouverture, sur ces sites. Il ne s'agissait pas, en revanche, de répondre aux critères plus stricts encore des ERP (Etablissements Recevant du Public).

Les correspondants de la DRAC (Madame Marie-Pierre Lanza, archéologue, pour Valaury, MM. Claude Sylvestre et Jean-Pierre Leroux, de la Municipalité, pour Lagnes, ont fait visiter au chef-mineur les fouilles en galeries des deux concessions.

Le 26 novembre 1998, le chef de projet du BRGM s'est rendu à Vallaury à la demande de la DRIRE de Marseille et du CCSTI de l'Argentière-la-Bessée, pour examiner si des solutions sécuritaires alternatives pouvaient être proposées pour la galerie Bérenguer, afin de permettre des fouilles archéologiques de sauvetage.

Les conclusions et recommandations de l'ensemble de cette expertise sont les suivantes.

1.1. SECURITE DE FOUILLES EN GALERIE SUR L'ANCIENNE CONCESSION POUR PLOMB, ZINC DE VALAURY (VAR)

1.1.1. Filons n° 1 et n° 2 (= groupe filonien du puits Victor)

L'étude des sites retenus par Mme Lanza pour les fouilles de la DRAC a commencé par les principaux travaux souterrains de la concession : ceux implantés sur les filons dits Filon n° 1 et Filon n° 2, connus aussi dans les archives sous le nom de Groupe filonien du puits Victor. Ces filons sont parallèles et très proches l'un de l'autre. Le Filon n° 1 a été dépilé sur 200 m d'allongement et 90 m d'amont-pendage. Le Filon n° 2 n'a fait l'objet que d'un début d'exploitation, il n'a pas pu être examiné lors de la visite (car il faut franchir d'abord les dépilages du filon n° 1, ce qui serait très dangereux).

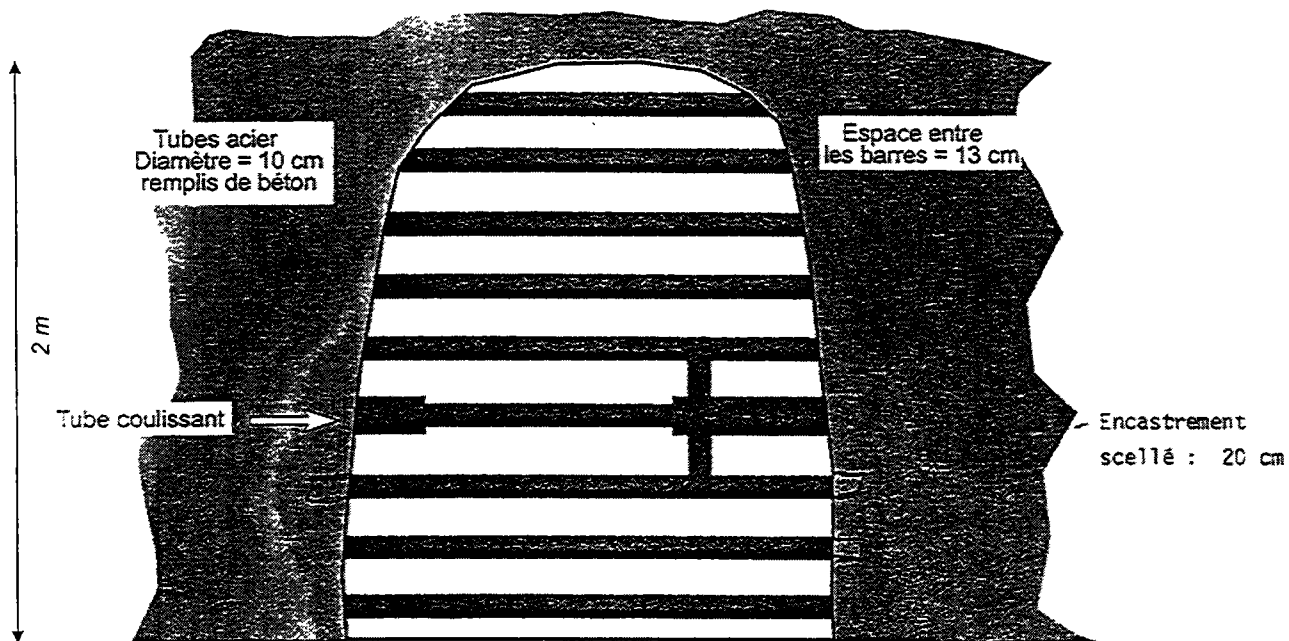


Fig. 1 – Galerie obturée par le système de barres (tubes aciers remplis de béton)

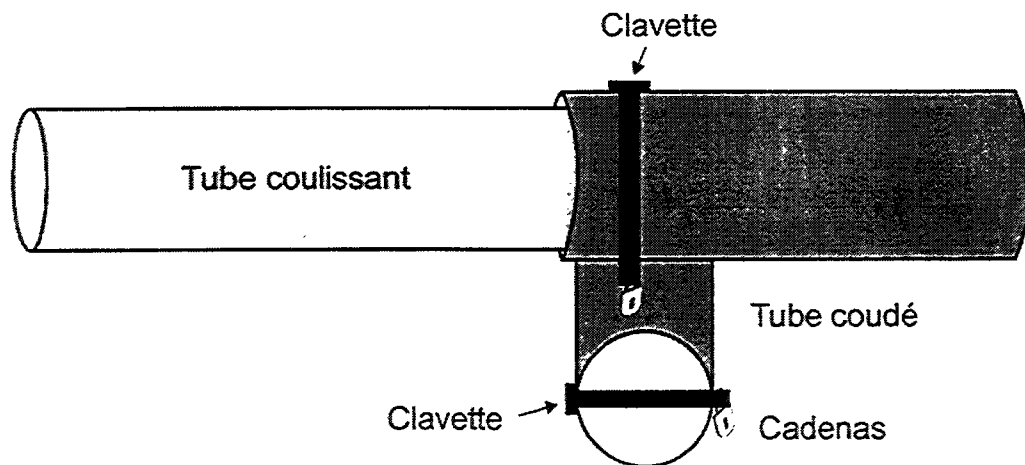


Fig. 2 – Système de fermeture par barre coulissant.

La visite du groupe filonien a débuté par la galerie du niveau 268. L'entrée de la galerie est à moitié obturée par des éboulis sur 4 ou 5 m. Il apparaît que la galerie avait été bouchée par un mur en pierres mais celui-ci a été démoli ; il en reste les traces sur les parements. Il s'agit d'une galerie saine dans son ensemble (ce qui n'exclut pas des risques d'effondrement, ailleurs, hors de vue, en amont ou en aval).

Dans cette galerie, à 25 m environ de l'entrée, un puits dangereux s'ouvre au point où la galerie rencontre le défilage du filon n° 1. Ce puits est entièrement ouvert, de section 3 x 3 m et de 35 m de profondeur. On peut le contourner par la droite et poursuivre ainsi le cheminement dans le travers-banc qui continue sur 30 m et qui est borgne. A droite, s'ouvre un défilage dangereux par chambres et piliers, où le soutènement n'est plus renforcé que par quelques buttons (madriers d'étayage) en bois pratiquement pourris ; néanmoins le terrain apparaît sain, sans trop de danger direct. A une quinzaine de mètres de là, le défilage venant du niveau inférieur a percé sur 3 ou 4 m le sol de la galerie : si la DRAC veut travailler en sécurité, il faudra étayer pour passer et faire les fouilles un peu plus loin, le défilage étant ouvert jusqu'au jour avec risque de chute de pierres depuis la surface. Sur le côté gauche du défilage, il est très dangereux de passer à côté du puits pour aller plus loin dans la galerie : il faut installer une passerelle avec un câble ancré dans les parois pour prévenir toute chute dans le puits. Les archéologues de la DRAC, spécialisés en spéléologie minière, ont déjà posé ce genre de main courante dans la mine de cuivre de Saint-Véran et ont la capacité de le faire ici avec le professionnalisme nécessaire.

Ces mesures de chantier prises, la DRAC pourra poursuivre son travail sur ce site dans la mesure où ses agents sont familiarisés avec les dangers de la spéléologie minière et prennent les précautions nécessaires. En revanche, pour empêcher tout accident du public non professionnel, il faudra poser une grille avec barreaux remplis de béton, scellés et ancrés dans la roche sur 20 cm (fig. 1) ; cette grille comportera en outre un barreau coulissant (pour libérer le passage d'un homme) avec cadenas (fig. 2). Le but de cette installation est que le public ne puisse pas entrer, le contournement du puits étant le danger majeur. En surface, la partie où le défilage est venu au jour devra être efficacement clôturée avec du grillage, pour le temps nécessaire aux fouilles de sauvetage archéologique et dans l'attente d'une mise en sécurité plus définitive du site.

La seconde visite effectuée en juillet 1998 a porté sur le niveau 235, niveau principal du groupe filonien. L'entrée du travers-bancs (qui est orienté NW-SE) est bâtie, sans danger, saine (cf. rapport BRGM R38932 texte p. 56 et photo n° 8 p. 67). Il y a un bon aérage. En juillet comme en novembre 1998, il y avait 40 cm d'eau sur une distance d'une dizaine de mètres. Après environ 130 m de galerie saine, le travers-banc débouche sur le défilage est-ouest du **Filon n° 1** qui se développe à gauche (vers l'est) et à droite (vers l'ouest), avec ses chambres et piliers, et qui remonte jusqu'au niveau 268, avec de place en place des trémies en rondins et des buttons en mauvais état. A partir de ce carrefour, on a d'abord visité le traçage de gauche (qui se dirige vers l'est). Le long de cette galerie, côté droit, s'ouvrent successivement deux puits intérieurs de profondeur inconnue, pleins d'eau (l'un d'eux alimentant un agriculteur en eau d'arrosage) ; le

premier de ces puits (Puits 1 des plans anciens, équipé d'un treuil) s'ouvre juste après le carrefour, le second dans une petite recoupe à droite, 50 m à l'est du carrefour (dénommé Puits 2 sur les plans anciens), s'enfonce vers le niveau 213. A cet endroit, il y a en outre, côté gauche de la galerie principale, une petite recoupe au milieu de laquelle remonte un troisième puits (échelle métallique, risque de chute de pierres) ; ce puits vient du niveau 268 et est appelé puits Saint-Victor. En reprenant la galerie principale en traçage vers l'est, on rencontre 50 m plus loin une recoupe à gauche, dans laquelle une échelle jalonne des grattages anciens dangereux, puis encore 50 m plus loin soit à 150 m du premier carrefour, dans une petite recoupe sur le côté droit, s'ouvre un dernier puits, venant du jour (dénommé Puits 3 sur les anciens plans), qui a été utilisé comme décharge (détritrus, rails, carcasse de voitures) et dont le fond est noyé comme les autres. Juste après, en allongement du filon, au plafond de la galerie principale, s'ouvre une cheminée verticale qui permet d'accéder aux niveaux supérieurs.

On est ensuite revenu au carrefour principal et on a visité le traçage de droite (celui qui se dirige vers l'ouest). En allongement, au bout de quelques mètres, on pénètre dans le défilage. Présence d'échelles métalliques plus ou moins vrillées et instables, risques de chutes de pierres. Le défilage inférieur débouche sur deux chambres et là aussi il faudra étayer pour pouvoir passer en meilleure sécurité.

L'accès du public doit être condamné. Pour permettre l'accès aux experts habilités et habitués aux dangers de la spéléologie minière, il faudra poser à l'entrée de cette galerie la même grille qu'au niveau 268 (fig. 1 et 2) et ceci à quelques mètres de l'orifice. Le puits qui a été en partie utilisé comme décharge avait été obturé en surface en 1987, mais cette première dalle ayant été, semble-t-il, cassée la décharge sauvage avait continué et une seconde dalle fut posée en 1991. Cette dernière dalle, comportant des crochets de levage, est amovible et l'on peut craindre qu'elle soit un jour déplacée ; il semble opportun de faire une mise en sécurité plus efficace, par remblayage complet du puits depuis la surface par les matériaux appropriés, ou pose d'un véritable bouchon ancré en béton.

La municipalité de Plan-de-la-Tour aurait manifesté le souhait de conserver ces ouvrages accessibles sous sa responsabilité.

En surface, à proximité de cette dalle, on observe un petit entonnoir rectangulaire de 4 x 2 m envahi de ronces denses, dont la profondeur visible n'est que de un mètre mais qui pourrait correspondre au débouché ancien d'un puits. Il faudra en tester la profondeur lors de la mise en sécurité du site, pour éventuellement l'obturer.

1.1.2. Filon n° 3 ou filon Bérenguiier

La troisième visite a porté sur le filon Bérenguiier (Filon n° 3). Au fond d'une tranchée d'accès d'une dizaine de mètres de long et de quelques mètres de profondeur, la galerie s'ouvre avec une section de 2 x 2 m et est longue d'une cinquantaine de mètres (cf. rapport BRGM R 38932 texte p. 55 et photo n° 7 p. 67). A environ 6 m de l'entrée, on

rencontre un trou boisé plein d'eau et d'une profondeur d'environ 3 m, et deux mètres plus loin on rencontre un puits de 3 x 3 m de section, de profondeur inconnue (les archives indiquent une profondeur de 30 m) plein d'eau également, dans lequel baigne un ancien treuil basculé. Pour franchir le premier puits, les anciens mineurs avaient posé des rondins et des traverses en bois dont certaines, le jour de la visite, tenaient encore assez pour permettre, à un personnel avisé, de passer sans risquer de tomber dans l'eau froide. Pour franchir le second puits, des rondins avaient été autrefois posés le long de chacun des côtés de la galerie mais ils sont pourris et seul un personnel avisé et compétent (mineur, géologue minier ou spéléologue minier) peut tenter de passer sur des rondins qu'il aura jetés en renfort, à la condition expresse d'être convenablement assuré par un compagnon tout aussi compétent.

Bien que l'accès à la galerie soit uniquement possible à pied et difficile à cause du maquis, cet ensemble de caractères avait décidé le chef mineur du BRGM qui a visité la galerie en juillet 1998 avec M.P. Lanza, à recommander le foudroyage de l'entrée de toute urgence, pour interdire l'accès au public. Mais les archéologues miniers ont demandé qu'un réexamen de la question soit fait, pour leur laisser le temps d'effectuer des fouilles de sauvetage. Le 26 novembre, une seconde visite a été faite par un géologue minier du BRGM ; il est bien apparu que le franchissement du premier puits et, surtout, celui du second ne sont possibles qu'à des personnels avertis et accoutumés aux dangers de la spéléologie minière et bien équipés. Il est donc hors de question de permettre à des personnels non habilités de s'aventurer dans cette galerie.

Puisque la DRAC souhaite faire procéder à des fouilles archéologiques dans la galerie, il faut procéder à deux types de travaux sécuritaires :

- interdire de toute urgence l'accès des personnes non autorisées et non compétentes, par la pose d'une grille cadenassée, dès l'entrée de la galerie ;
- assurer la protection, pour la durée des fouilles, des personnels habilités et compétents (pose d'une passerelle solide et stable sur les puits, pose d'une main courante pitonnée à la paroi).

Faute de quoi il faudra mettre tout l'ouvrage en sécurité par foudroyage de l'entrée le plus rapidement possible.

1.1.3. Filon n° 8

La visite a continué par le puits dit Sous-abri du Filon n° 8. On y accède (cf. rapport BRGM R 38932 texte p. 54 et photo n° 4 p. 65) par une tranchée de 10 m de long qui se prolonge par un début de galerie ressemblant à un abri sous roche, sous lequel le puits s'ouvre. Son accès est actuellement protégé par une barrière assez symbolique (trois barres métalliques superposées et horizontales, scellées dans les parois de la tranchée et entre lesquelles un imprudent peut se faufiler). Les bords du puits sont en pente et glissants : le risque est qu'un visiteur, même expérimenté, dérape et chute mortellement.

Les mesures de sécurité actuelles sont absolument insuffisantes. D'après les archives, le puits dessert deux traçages aux cotes 277 et 257 et il s'y épanouirait un petit défilage au point de rencontre du filon des Communaux. Tant que les fouilles archéologiques jugées indispensables ne sont pas achevées, les personnels de la DRAC habitués aux techniques d'escalade peuvent descendre au moyen de cordes de rappel et, pour la signalisation, faire poser des pancartes portant une tête de mort (symbole intelligible même des éventuels minéralogistes étrangers dont les visites sont possibles sur la Côte d'Azur en été) et la mention " Danger ". Mais ensuite le puits devra être mis en sécurité par bouchage complet le plus rapidement possible. La Municipalité envisagerait de le conserver mais ce projet ne semble pas viable.

1.1.4. Filon n° 7

La visite a continué par les ouvrages du filon Lorgues 7. Il s'agit d'un puits bâti en surface, dont la profondeur est inconnue. Il y a aussi un court travers-banc et trois effondrements (cf. rapport BRGM R 38932 texte p. 55 et photos n° 5 et 6 p. 66). L'archéologue de la DRAC évaluant la durée de la fouille nécessaire à une heure, c'est le risque à prendre pour les experts habilités (en fonction de l'enjeu scientifique) mais ensuite il est impératif de mettre définitivement l'ouvrage en sécurité par bouchage complet.

1.1.5. Filon n° 5

La visite du filon des Communaux (dit Filon n° 5) aboutit aux mêmes recommandations draconiennes.

1.1.6. Conclusion

A Valaury, les travaux sécuritaires les plus impératifs pour permettre la poursuite des fouilles archéologiques dans des conditions de sécurité acceptables au plan de la spéléologie minière, sont principalement la pose d'une grille métallique, d'une passerelle intérieure et d'une main courante au filon Bérenguier, la pose de deux grilles métalliques (fig. 1 et 2) aux niveaux 268 et 235 du Filon n° 1, la pose d'une clôture grillagée tout autour de l'arrivée du défilage de ce filon au jour et la pose de quelques étais, soit un coût de l'ordre de 50 kF. Une signalisation préventive et d'alerte sera mise en place aux abords du puits Sous-abri du Filon n° 8. Dans tous les cas, ces mesures n'auront qu'un caractère transitoire et des solutions sécuritaires plus définitives devront être ensuite appliquées à l'ensemble du site.

La visite de contrôle de novembre 1998 a permis de constater qu'un bulldozer (travaillant pour M. Jaudel) était en train d'ouvrir une piste et d'aménager des terre-pleins aux abords de la tête du filon n° 2. Que ce travail soit destiné à planter un vignoble comme un habitant nous l'a dit, ou à construire des villas, il doit être souligné que cette zone très accueillante au plan touristique risque d'être à court terme l'objet d'une urbanisation pavillonnaire et d'une fréquentation accrue du public, ce qui

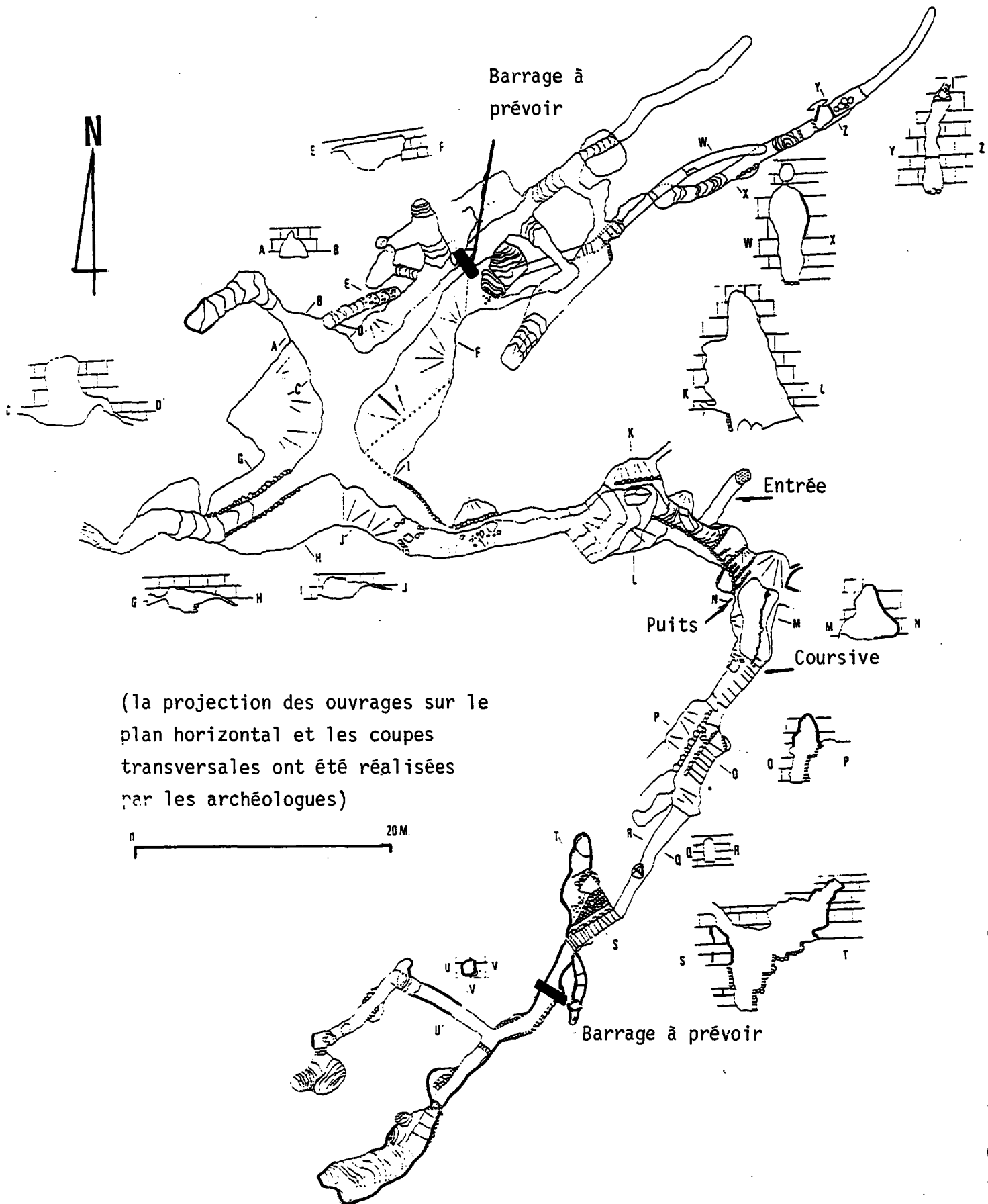
augmente le risque d'accidents liés aux vestiges de l'activité minière passée, si ces derniers ne sont pas rapidement mis en sécurité.

Par ailleurs, l'expertise a permis au BRGM de confirmer que les souhaits de la municipalité de conserver l'accès du Filon n° 1 sous sa responsabilité sont très pertinents (mis à part l'intérêt archéologique dont la mesure est du ressort de la DRAC) au plan du patrimoine géologique. En effet, les dépilages sont parmi les plus beaux vestiges restant encore accessibles dans les filons de la Provence cristalline qui au plan économie industrielle ont eu au XX^e siècle une importance nationale (zinc des Bormettes, fluorine et barytine de Fontante, Les Porres). La structure du filon est visible de façon très pédagogique et le remplissage minéralisé très représentatif (fluorine, barytine, galène) de la « signature » métallogénique provençale. Si globalement la roche est saine et les ouvrages actuellement encore de bonne tenue apparente, néanmoins les boisages sont putrescibles, les puits noyés dangereux et les parcours d'échelles en zones susceptibles de chutes de pierres absolument prohibés. Il y a encore beaucoup de confortements et de barrages à faire avant que ces ouvrages puissent être habilités comme ERP (Etablissement pouvant Recevoir du Public).

1.2. SECURITE DE FOUILLES EN GALERIE SUR L'ANCIENNE CONCESSION POUR FER DE LAGNES (VAUCLUSE)

La mission commandée par la DRAC, en concertation avec la Municipalité, portait sur le réseau supérieur de l'ancienne mine dite du Pieï, à proximité immédiate du village de Lagnes. Les autres réseaux, étudiés au plan archéologique par D. Morin, P. Rosenthal et A. Faivre (1997), n'étaient pas inscrits dans la mission et les conclusions ci-après ne les concernent pas.

L'entrée actuelle du réseau visité se trouve en haut du village derrière l'église (à l'origine elle n'était pas l'entrée principale de la mine). Cette entrée est partiellement comblée : la descente s'y effectue en se faufilant dans un tubage sommaire composé de deux fûts métalliques de 200 l ouverts à leurs extrémités. Au bout de quelques mètres, d'une galerie étroite, on arrive dans une première grande chambre (fig. 3). Si l'on descend sur la gauche, on observe un puits, une cheminée, et l'on termine sur des culs de sac très étroits. Si l'on descend à droite de l'entrée, on rencontre plusieurs chambres puis l'on arrive dans un dédale de chambres et de galeries (avec quelques boisages) qui ne présentent pas d'aspect *a priori* menaçant mais qu'il serait trop délicat de mettre en sécurité pour permettre l'accès à tout public. Ce dédale semble correspondre au réseau décrit par les archéologues.



(la projection des ouvrages sur le plan horizontal et les coupes transversales ont été réalisées par les archéologues)

Fig. 3 – Plan et coupes de la mine du Pieï, Lagnes et recommandations.

Globalement, le réseau souterrain semble de creusement très ancien : les voûtes des chambres sont revêtues de cristallisations qui ne laissent voir aucune fissure ni décollement menaçant, l'ensemble s'apparentant à un ancien réseau karstique naturel avec le degré de stabilité habituel de ces réseaux (le gîte de Lagnes est d'ailleurs répertorié comme un gisement de fer karstique sur la carte des gîtes minéraux de la France à 1/500 000).

Par suite, il ne semble pas utopique de vouloir mettre en valeur ce patrimoine, sous réserve d'avoir préalablement aménagé une entrée convenable, établi des barrages (définitifs ou réversibles mais infranchissables et cadennassés) sur les parties dangereuses auxquelles le public ne doit pas pouvoir accéder, et mis en sécurité définitive le puits et la cheminée borgne.

1.3. CONCLUSION DES EXPERTISES SECURITAIRES DE FOUILLES

Les archéologues miniers sont exposés, dans l'exercice des missions de fouilles qui leur sont assignées par la DRAC, à deux types de risques contre lesquels les mesures recommandées sont explicitées dans les paragraphes suivants.

1.3.1. Risques inhérents à la fréquentation du milieu souterrain et globalement à l'exercice de la spéléologie minière

Ces risques sont connus des archéologues miniers et des géologues miniers, ils sont intrinsèques de leur activité professionnelle. Même dans des galeries saines, ces risques sont réels (risque de traumatisme ou de fracture si la tête vient à heurter la paroi violemment avec ou sans casque, risque de chute dans un puits en cas de défaillance musculaire inopinée, d'épuisement, ou de panne de l'éclairage individuel, troubles liés à la claustrophobie pour les sujets sensibles, etc.). Normalement, les experts de ces disciplines y sont préparés et ont la maîtrise de la façon de les prévenir.

En revanche, on ne doit y exposer, ni des personnes d'autres professions (elles ne sont préparées à ces risques ni techniquement, ni statutairement), ni le public.

La parade est une condamnation efficace totale des accès, avec possibilité d'équiper un ou deux d'entre eux par des fermetures réversibles pour laisser accès aux professionnels autorisés (et strictement à ceux-ci). Dans certains des sites visités sur la concession de Valaury, cette option n'offre pas assez de garantie ou est techniquement trop compliquée, onéreuse ou difficile à réaliser par rapport au besoin des fouilles, et l'obturation complète et irréversible de l'ouvrage est préconisée.

1.3.2. Risques spécifiques liés aux parties d'ouvrages signalées comme dangereuses même pour les professionnels

Les mesures de sécurité à prendre sont décrites pour permettre (aux experts habilités) la pratique des fouilles archéologiques en limitant les risques à ceux qui sont inhérents à l'exercice de la spéléologie minière (auxquels ils sont techniquement et statutairement préparés).

Sur la concession de Lagnes, il ne semble pas utopique de vouloir mettre en valeur le patrimoine représenté par la mine du Pieï, sous réserve d'avoir préalablement aménagé une entrée convenable, établi des barrages (définitifs ou réversibles mais infranchissables et cadenassés) sur les parties dangereuses auxquelles le public ne doit pas pouvoir accéder, et mis en sécurité définitive le puits et la cheminée borgne.

2. Complément à l'étude structurale du gîte du Fournel

Venant après l'étude réalisée en 1997 (rapports BRGM R 39624 et R 39901), cette étude avait pour but de fournir un appui complémentaire aux archéologues miniers du Centre de culture scientifique, technique et industrielle (CCSTI) de la municipalité de l'Argentière-la-Bessée (Hautes-Alpes), au cours du relevé géologique et structural de l'ancienne mine de plomb argentifère du Fournel qu'ils ont entrepris.

Il s'agissait, par de nouveaux relevés et observations, effectués en mine et en surface, d'apporter des précisions aux résultats obtenus en 1997, en tentant notamment de définir la géométrie du gisement et des grands ensembles et structures géologiques environnants.

Au cours d'une mission de deux jours de terrain, les 7 et 8 octobre 1998, des relevés géologiques et structuraux ont été effectués par le Géologue Régional du BRGM, expert en analyse structurale, en compagnie de B. Ancel (CCSTI) dans les secteurs ancien et moderne du quartier de Saint-Roch (7 octobre 1998), ainsi que dans celui de la Rebaisse et en rive droite du torrent du Fournel, à hauteur de Rebaisse et des Vieux travaux.

Le présent rapport expose les résultats obtenus ainsi que les interprétations qui peuvent en être faites. Il se réfère aux résultats de l'étude de 1997 (rapport BRGM R 39624), lesquels ne seront pas rappelés ici.

2.1. DESCRIPTION DES PRINCIPALES OBSERVATIONS EFFECTUEES

2.1.1. Quartier de Saint-Roch

Ce quartier se situe immédiatement à l'ouest du secteur de Combe Blanche, et comprend deux parties : moderne et médiévale.

a) Partie moderne (fig. 4)

Une veine minéralisée est visible vers l'extrémité nord de la grande galerie N-S des travaux modernes. Sa direction est NE-SW et son pendage, dirigé vers le sud-est, est compris entre 35° et 50° (stations n° 48 et 49, fig. 4). La veine est parfois unique, peu épaisse (15 à 20 cm) et son toit a rejoué en faille (ph. 1, station 49B) ; mais, à proximité (station 48, ph. 2), l'épaisseur de la veine (quartz + galène + traces de malachite) est de 1 m environ.

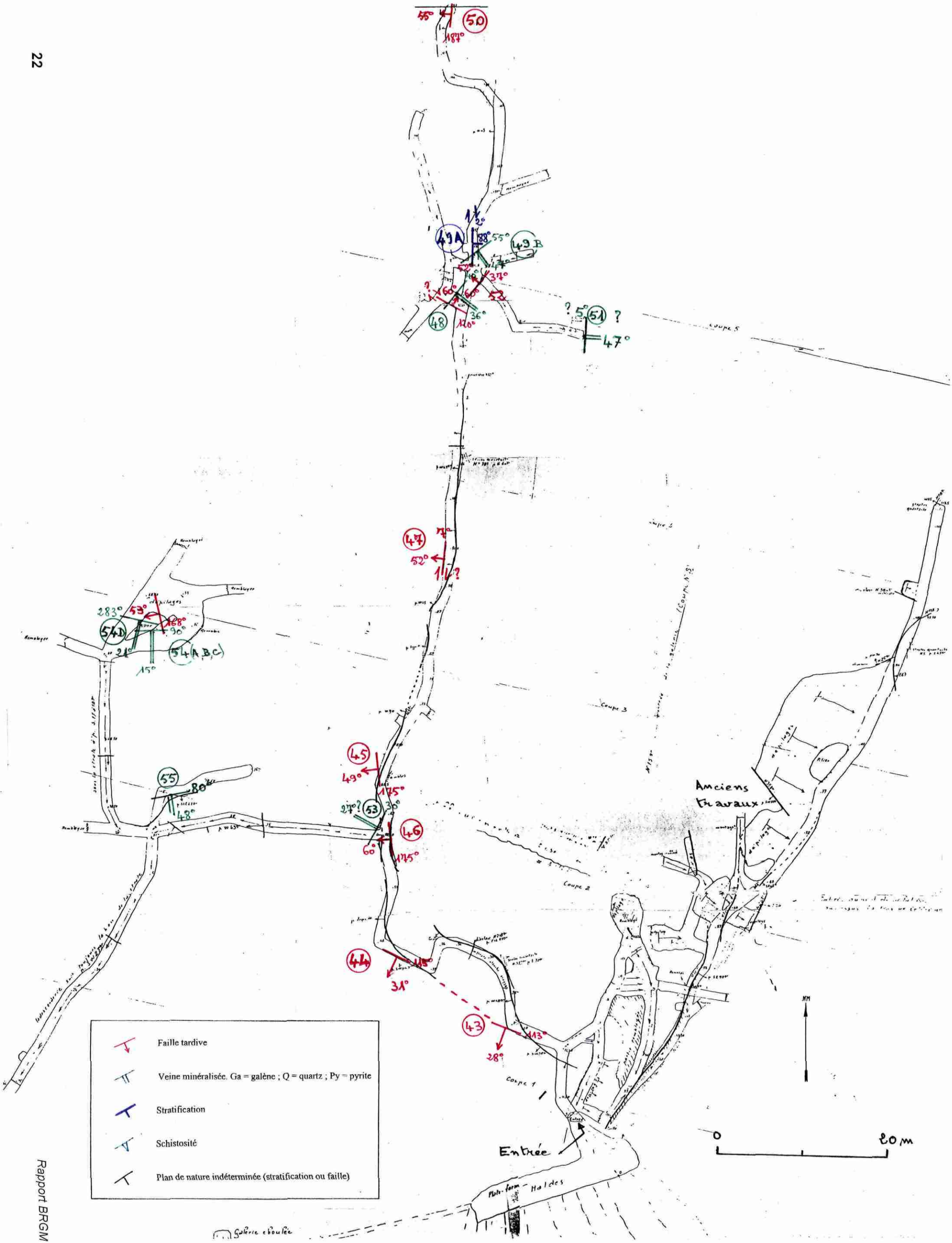


Fig. 4 – Mine du Fournel, quartier Saint-Roch, plan des Travaux Modernes : relevés structuraux (topographie et géologie par Dufour et Poulain, vers 1960).

La stratification des quartzites est N-S et subverticale ; de petites fentes d'extension à remplissage de quartz laiteux témoignent de son rejeu en petit cisaillement dextre (station 49A, ph. 3).

La grande galerie N-S suit une faille tardive subméridienne dont le pendage varie de 50° à 60° vers l'ouest.

Plus au sud, près de l'entrée de la galerie, il est possible d'observer en deux endroits (stations n° 43 et 44) une faille tardive NNW-SSE (N113° ou 115°E) faiblement inclinée vers le sud (pendage d'une trentaine de degrés). Cette faille est soulignée par une zone broyée qui peut atteindre 20 cm d'épaisseur.

Dans la partie occidentale de ce quartier moderne, la veine minéralisée montre une direction E-W (N80° à 105°E) et un pendage dirigé vers le sud, oscillant entre 15° et 25° (station 54). La minéralisation en galène contient des petites " flammèches " de quartz et elle est affectée par une faille subparallèle à la veine. Cette faille qui se dédouble parfois, atteste du rejeu cassant de la veine (ph. 4, 5 et 6). Cette veine faillée est recoupée et décalée par une petite faille normale ramifiée orientée N170°E-55°W (ph. 7).

b) Partie médiévale (fig. 5)

Dans cette partie ancienne de Saint-Roch, la direction de la veine minéralisée varie de N-S à NE-SW ; elle est inclinée vers l'est et son pendage est compris entre 25° et 50° (stations 57 à 67).

Au point d'observation (station) n° 65, le toit et le mur de la veine ont joué en faille, les stries de glissement indiquant un jeu décrochant, vraisemblablement lié au jeu décrochant des grandes failles de direction proche de N-S.

Dans la partie nord-est de ces anciens travaux, un petit filon de barytine a une orientation N60°E-40°SE, légèrement différente de celle des veines à galène et quartz. Dans ces anciens travaux, les plans de stratification des quartzites sont subméridiens et subverticaux ou fortement inclinés vers l'est.

Le gisement est légèrement perturbé par une ou deux grandes failles décrochantes NNE-SSW (N10°E à N35°E), à fort pendage dirigé vers l'est (stations n° 64, 65 et 68).

Une faille E-W subverticale est présente au point d'observation n° 69.

2.1.2. Quartier de Rebaisse – Vieux Travaux (fig. 6)

Les relevés effectués en octobre 1998 complètent ceux réalisés en juin 1997 ; c'est pourquoi il sera fait appel à ces derniers.



	Faille tardive
	Veine minéralisée. Ga = galène ; Q = quartz ; Py = pyrite
	Stratification
	Schistosité
	Plan de nature indéterminée (stratification ou faille)

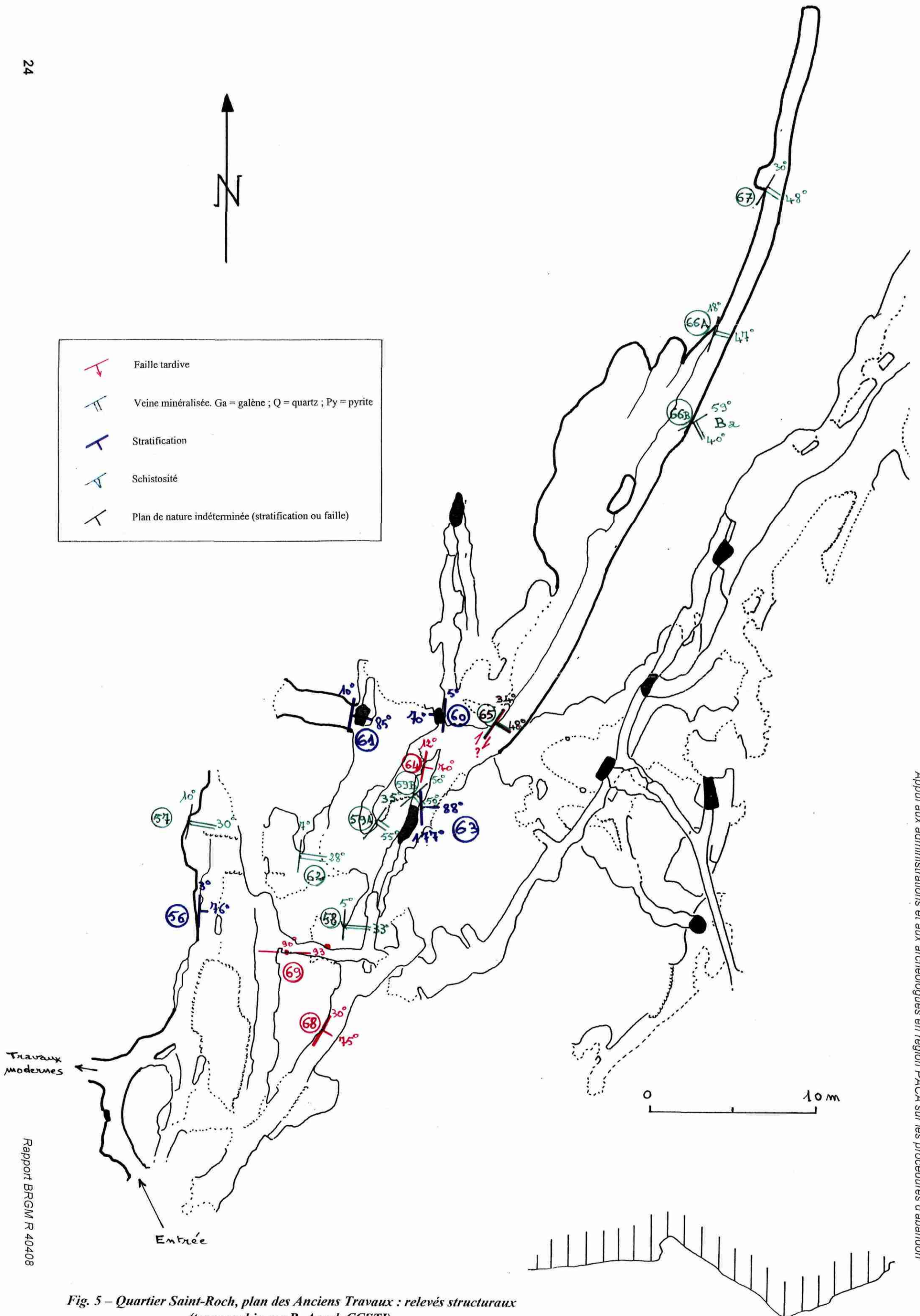


Fig. 5 – Quartier Saint-Roch, plan des Anciens Travaux : relevés structuraux (topographie par B. Ancel, CCSTI).

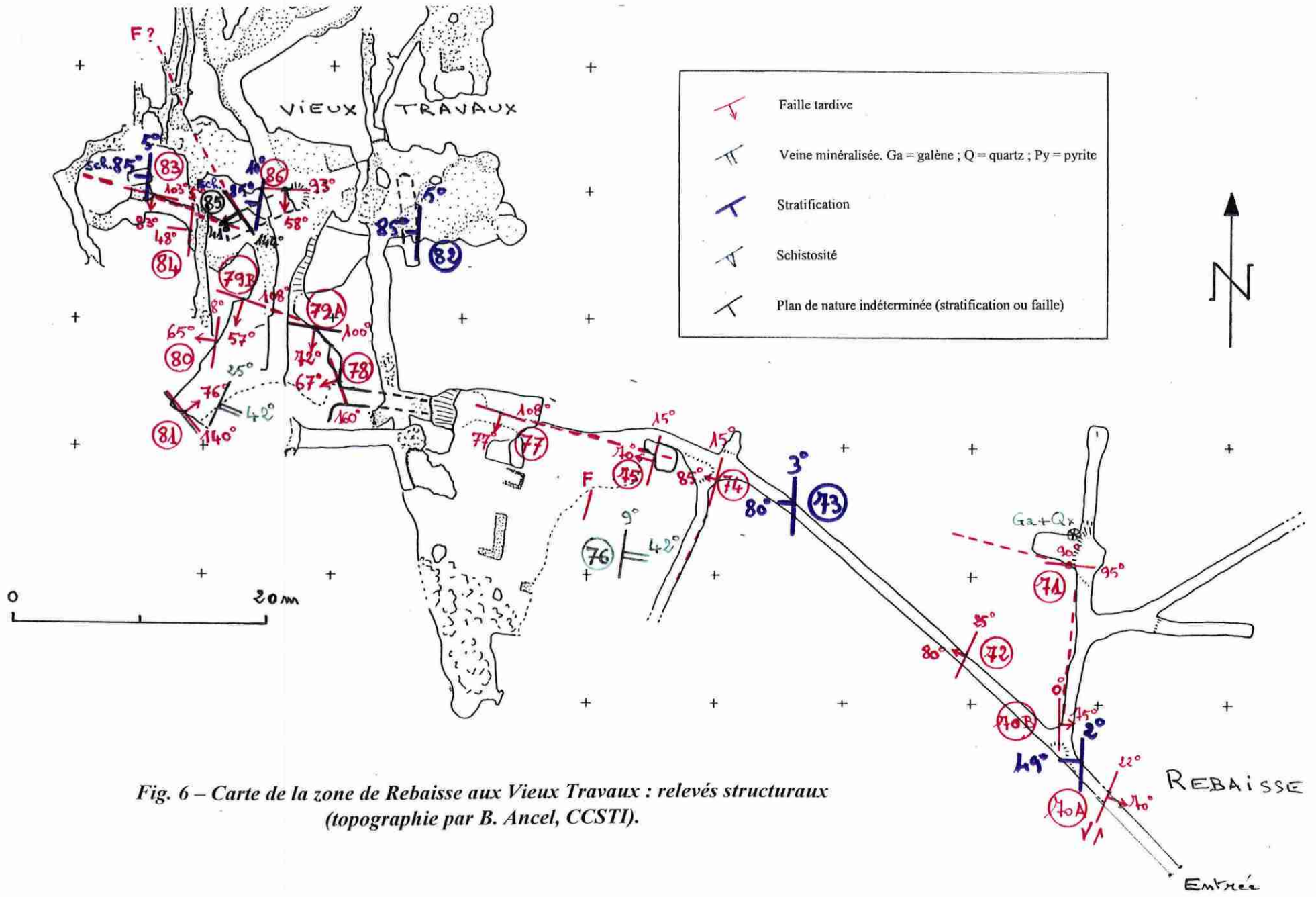


Fig. 6 – Carte de la zone de Rebaïsse aux Vieux Travaux : relevés structuraux (topographie par B. Ancel, CCSTI).

Dans la galerie NW-SE de Rebaisse, qui rejoint la salle de la roue, la stratification des quartzites est subméridienne et le pendage, dirigé vers l'ouest, varie de 50° à 80° (stations n° 41, 70 et 73).

Les failles tardives ont des directions N-S à NNE-SSW et un pendage fort ($\geq 70^\circ$) dirigé tantôt vers l'est, à proximité de l'entrée de la galerie, tantôt vers l'ouest (stations n° 70 à 75). Une faille E-W subverticale a été relevée dans une galerie N-S (station n° 71), diverticule de la galerie principale NW-SE.

Dans les environs de la Salle de la Roue, de part et d'autre de la grande faille dextre subméridienne (stations 25 à 27 de 1997), la veine minéralisée et exploitée montre une direction variant de NNW-SSE à NNE-SSW et un pendage vers l'est compris entre 30° et 45° (stations 27, 28, 76 et 81).

La faille E-W normale, déjà repérée (station n° 30 de 1997), peut également être observée à un niveau inférieur (stations n° 77 et 79). Elle paraît décalée d'environ 5 m par la grande faille N-S dextre observée en 1997 aux points n° 25 à 27.

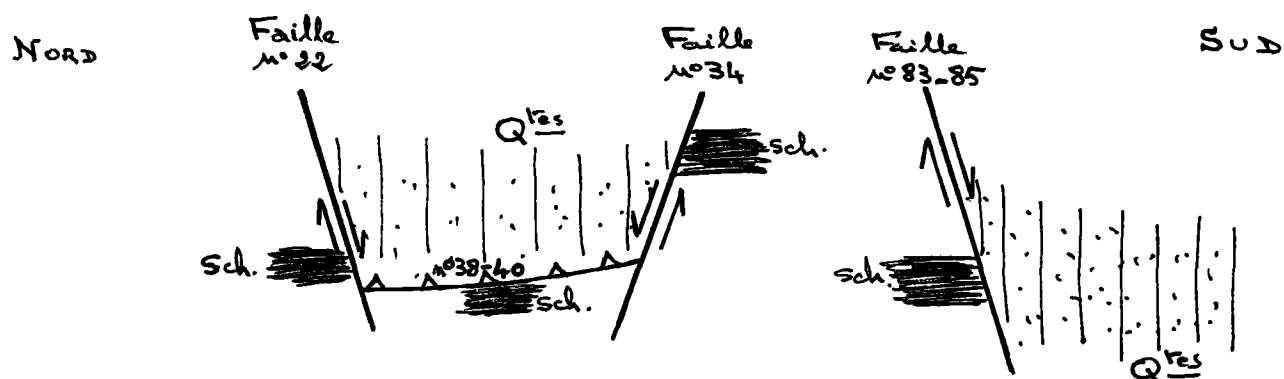
Dans les stations n° 83 à 85, une autre faille subéquatoriale (N85°E à N105°E) et à pendage sud (63° à 85°) sépare les schistes noirs du Werfénien supérieur (t1b de la carte géologique à 1/50 000) des quartzites du Werfénien inférieur (t1a), qu'elle abaisse donc par rapport aux schistes. Les stratifications des quartzites et des schistes, sensiblement les mêmes, sont orientées N5° à 10°E – 85°W (stations n° 82, 83 et 85).

Vers le nord-est, le contact schistes-quartzites paraît correspondre à une faille N130° à 160°E – 35° à 50°SW.

L'observation de la faille E-W abaissant les quartzites et "remontant" les schistes est à rapprocher de celles des stations n° 34 (surface), 22, 38 et 40. Dans les deux dernières (stations n° 38 et 40), les quartzites t1a, dont la stratification est fortement pentée à l'ouest (N0° \pm 5° - 65° à 70°W), surmontent par l'intermédiaire d'un contact chevauchant minéralisé, les schistes noirs d'âge plus récent (t1b). La faille orientée N65°E – 80°S observée au point d'observation n° 22 abaisse les quartzites du compartiment sud, par rapport aux schistes du compartiment nord.

La faille d'orientation N97°E – 80°N (station de surface n° 34) correspondant à la "grande faille" des Vieux travaux, abaisse également les quartzites situés dans son compartiment nord et surélève les schistes de son compartiment sud.

Ainsi, du nord vers le sud, il existe une succession de petits horsts (nord de faille n° 22 et entre les failles n° 34 et n° 83-85) et de petits fossés effondrés (entre les failles n° 22 et 34, et au sud de la faille n° 83-85), selon la coupe très schématique suivante :



Les failles n° 34 et n° 83-85 sont vraisemblablement décalées par les failles dextres N-S à NNW-SSE, comme notamment la grande faille dextre n° 25 à 27 étudiée en juin 1997, près de la Salle des Roues.

2.1.3. Galerie en rive droite du torrent du Fournel (fig. 7)

Dans cette galerie, la stratification des quartzites est orientée N-S à NNW-SSE, avec des pendages de 55° à 80° dirigés vers l'ouest (stations n° 87, 92 et 93).

Elle recoupe des failles tardives dont la direction varie de N155°E à N30°E pour des pendages inclinés vers l'ouest de 55° jusqu'à la verticale. L'une d'elles peut être observée au niveau de la cascade d'un petit affleurement du torrent du Fournel (station n° 87, photo n° 8).

Près de l'entrée de la galerie, une faille N155°E-65°SW décale de quelques centimètres et de façon dextre, une petite faille N80°E-65°N (station n° 88). Au fond de la galerie, les schistes noirs apparaissent en contact normal avec les quartzites, l'orientation de ce contact étant N160°E-80°E ; il est cependant possible que ce contact stratigraphique normal ait joué en faille après son redressement à la verticale. La localisation de ce contact et son orientation sont en accord avec le fait que, plus au nord mais toujours en rive droite du torrent du Fournel, les anciens bâtiments de la direction de la mine soient construits sur les quartzites.

2.1.4. Observations au jour de la rive droite du torrent du Fournel (fig. 8)

A partir de l'affleurement de la cascade, vers l'est, les plans de stratification des quartzites ont des directions N-S à NNW-SSE et des pendages dirigés vers l'ouest, avec des valeurs comprises entre 55° et 70°.

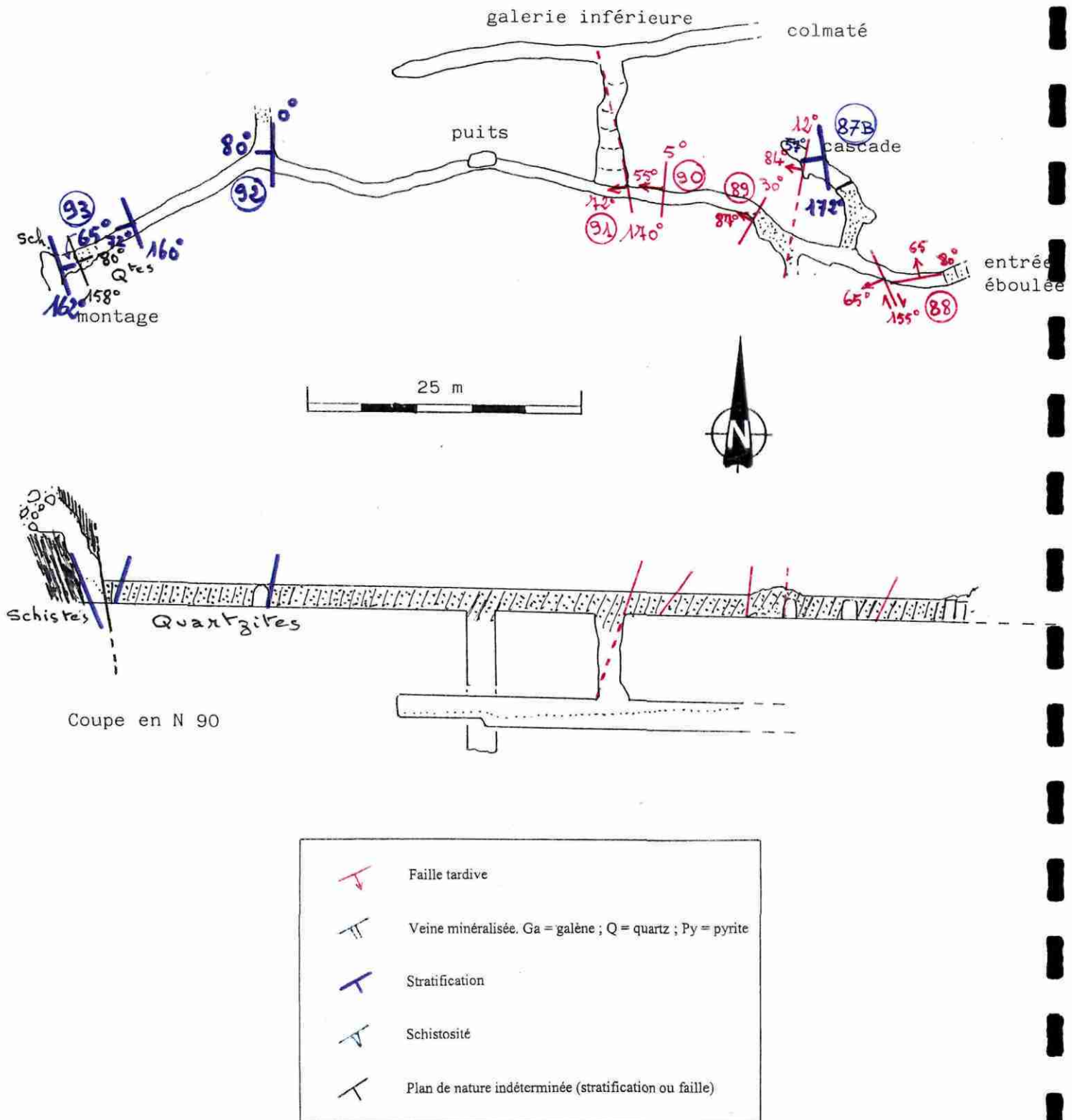


Fig. 7 – Carte et coupe longitudinale de la Galerie Rive Droite (du torrent du Fournel) : relevés structuraux (topographie par B. Ancel, CCSTI).

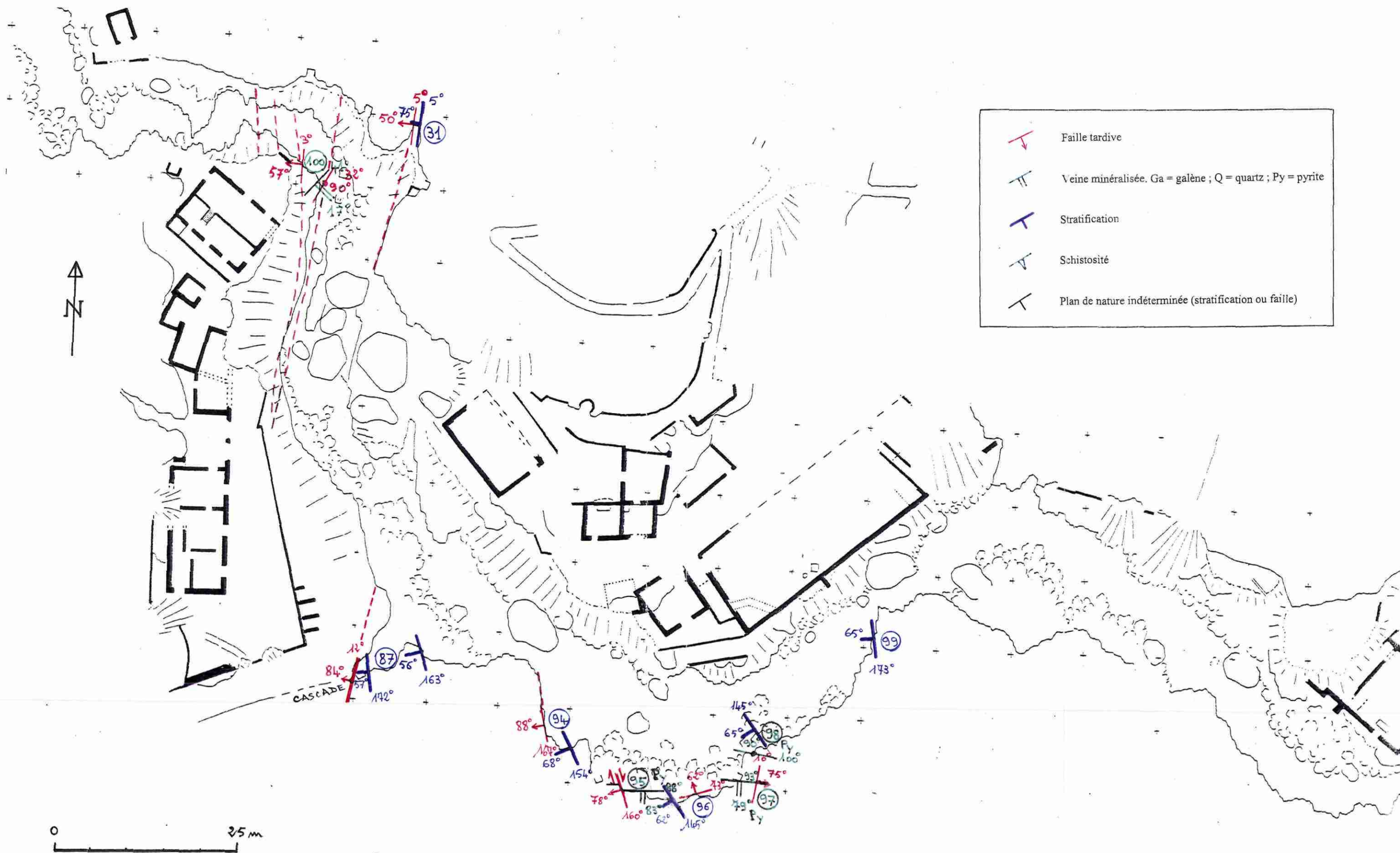


Fig. 8 – Carte de la rive droite du torrent de Fournel : relevés structuraux (topographie par B. Ancel, CCSTI).

Dans les stations n° 95 à 98, on observe de petites discontinuités subverticales remplies de pyrite sur une épaisseur ne dépassant pas 1 ou 2 cm (ph. 9). Ces filonnets à pyrite sont pratiquement parallèles à de petites failles normales E-W à pendage fort (80° à 85°) dirigé vers le sud (station n° 95). Ces filonnets pyriteux et ces petites failles E-W sont décalés de quelques centimètres par des failles NNW-SSE dextres normales (ph. 10, 11 et 12). Les filonnets à pyrite sont parfois subhorizontaux (photo n° 9).

Au nord de la faille de la cascade, il existe une veine peu épaisse minéralisée en galène (station n° 100, photos n° 13 et 14). Comme dans les travaux modernes de Saint-Roch, cette veine peu inclinée a rejoué en faille, car elle est affectée par un plan de cisaillement qui lui est parallèle. Ce plan de faille très lustré ne permet pas de distinguer des stries de glissement ; il est orienté N40°E-17°SE.

La veine et la faille qui l'affecte sont recoupées par des failles de deux types différents :

- l'une subverticale et de direction NNE-SSW doit correspondre à un décrochement senestre d'après le décalage de la veine qu'il entraîne (rejet vertical de 40 cm environ) ;
- plus à l'ouest, la petite veine est décalée par une série de 3 ou 4 petites failles normales dont l'une est orientée N5°E-55 à 60°W.

2.2. INTERPRETATION DES RESULTATS

2.2.1. Situation chronologique des minéralisations

Si l'on prend en compte la chronologie de mise en place de la minéralisation en galène et quartz proposée en 1997, soit un âge miocène, la pyrite apparaissant dans des fractures E-W se serait mise en place ensuite au cours de l'extension pliocène.

En effet, il semble que du seul point de vue tectonique, les failles normales E-W aient pu jouer en même temps que les failles normales subméridiennes tardives (post-minéralisation), attribuées au Pliocène ; mais, dans ce cas, la pyrite aurait dû envahir également des fractures NNW-SSE, ce qui jusqu'à présent n'a pas été observé.

Par ailleurs, il a été noté que les veines minéralisées en galène et quartz, d'une part, ont des directions variant de N-S à E-W en passant par NE-SW et, d'autre part, ont été cisailées par des failles qui leur sont pratiquement parallèles, d'où une autre interprétation légèrement différente peut être proposée. Elle consiste à considérer que la mise en place des veines à galène et quartz s'est faite le long de fractures inverses de direction moyenne NE-SW ou NNE-SSW correspondant dans les quartzites à la schistosité S1, c'est-à-dire à la fin de la phase II synmétamorphique et d'âge éocène (Tricart, 1980).

Ainsi, la pyrite aurait pu se mettre en place ultérieurement dans des fractures subéquatoriales, au cours d'une extension proche de N-S, pendant l'Oligocène (Labaume *et al.*, 1989).

C'est ensuite au cours de la phase III d'âge oligocène terminal – miocène inférieur (Aquitaniens) ayant développé de nouveaux plis et des chevauchements (Tricart, 1980), que les veines à galène auraient été cisillées.

Par la suite, au Pliocène, les failles tardives normales (NNW-SSE et NNE-SSW) ont affecté les veines à galène et les filonnets à pyrite avant qu'au Quaternaire, les failles NNW-SSE décrochantes dextres n'affectent l'ensemble des structures tectoniques et minéralisées antérieures.

Cette dernière interprétation qui modifie quelque peu la chronologie établie en 1997 et vieillit la mise en place de la galène (âge éocène supérieur au lieu de l'âge miocène proposé précédemment), a l'avantage de mieux rendre compte de l'ensemble des résultats acquis actuellement.

2.2.2. Géométrie des ensembles géologiques

Au vu des résultats acquis à ce jour, il est probable qu'il existe non pas une seule veine minéralisée en galène et quartz, mais, au contraire, plusieurs veines de puissance totale et de teneur en galène très variables, comme cela était envisagé dans le rapport BRGM R 39901 (1997).

Par ailleurs, une première interprétation exposée plus haut dans le présent rapport au § 2.2.2, reprenant les observations recueillies en 1997 et 1998 dans les quartiers des Vieux Travaux et de Rebaisse, montre qu'il est possible de définir, ou du moins d'esquisser dès à présent dans ce secteur, l'agencement des différents volumes et structures géologiques.

Cela incite à poursuivre les relevés géologiques et structuraux, tout en réalisant en parallèle le nivellement des galeries des différents quartiers, afin de déterminer leur attitude et de pouvoir réaliser ensuite une série de coupes E-W et N-S, à travers le gisement.

2.3. NOUVELLES CONCLUSIONS DE L'ETUDE STRUCTURALE

A l'issue de cette intervention d'appui au CCSTI pour le relevé géologique et structural de différents quartiers de la mine du Fournel, il a été possible de recueillir de nouvelles observations, complémentaires de celles effectuées en 1997. L'analyse de l'ensemble de ces données permet de proposer une variante au calage chronologique de la mise en place des minéralisations par rapport aux structures tectoniques.

Les veines à quartz et galène seraient venues envahir des discontinuités (failles inverses et chevauchements mineurs) de direction moyenne NE-SW, inclinées au sud-est et apparues au cours de la phase de mise en place symmétamorphique des unités briançonnaises (phase II de Tricart, 1980). Cette mise en place se serait donc produite à la fin de l'Eocène, au lieu de l'âge miocène proposé en 1997. Les filonnets à pyrite liés à des failles normales E-W seraient apparus au cours d'une extension NW-SE à N-S d'âge oligocène. Par la suite, au cours de la compression E-W Oligocène supérieur-Miocène inférieur (phase III de Tricart), les veines à galène et quartz auraient été cisillées par des failles qui leur sont parallèles.

Les failles tardives NNW-SSE, d'abord normales au Pliocène, puis décrochantes dextres au Quaternaire, décalent les veines minéralisées et les structures tectoniques antérieures.

La géométrie des veines minéralisées et des ensembles et structures géologiques qui les contiennent ou constituent leur environnement pourra être définie par des plans et des coupes E-W et N-S, comme cela est démontré au § 2.2.2 de ce rapport pour les quartiers de Rebaisse et des Vieux Travaux.

Pour cela, il est nécessaire de :

- réaliser un nivellement des galeries des divers quartiers de la mine ;
- continuer les relevés géologiques et structuraux en commençant par repérer et mesurer les orientations des veines minéralisées, la limite schistes-quartzites et les grandes failles tardives.

Pour les failles, en plus du relevé des directions et des pendages, il est nécessaire de relever les orientations ou le plongement (pitch) des stries de glissement et de déterminer, si possible, le sens du mouvement (normal, inverse, dextre ou senestre).

Après report sur les plans des divers quartiers de la mine remis à la même échelle, il sera possible de réaliser les coupes géologiques E-W et N-S qui permettront vraisemblablement de réaliser un ou plusieurs blocs diagrammes de l'exploitation.

3. Analyse chimique des minerais du Fournel

Les rapports conservés dans les archives du Service des Mines (DRIRE) contiennent de nombreux résultats d'analyses chimiques du minerai du Fournel, faites à diverses périodes de l'exploitation de la mine. Si dans certains cas, les conditions d'échantillonnage et donc la représentativité de l'analyse sont explicitées, en général les résultats contenus dans les archives sont bruts et leur fiabilité est entachée de doute. C'est pourquoi il importait aux archéologues de refaire une campagne d'échantillonnage en galeries, afin de jeter les bases saines pour l'interprétation des données sur la rentabilité de la mine aux diverses périodes historiques de son exploitation.

3.1. CONDITIONS D'ECHANTILLONNAGE (fig. 9 et 10)

Suivant les recommandations de l'expertise géologique et structurale de juin 1997, les archéologues miniers ont sélectionné, dans les vieux travaux du Fournel, un certain nombre de piliers et de parements pour échantillonnage, localisés suivant des profils et des coupes verticales transverses au gisement de façon à permettre des corrélations géologiques entre les différents points de mesure.

En octobre 1997, l'échantillonnage de ces sites a été effectué, en utilisant la méthode de grab sampling (car la méthode par rainurage n'était pas applicable). Il avait été prévu quatre échantillons en mine mais la diversité des points intéressants a justifié le prélèvement de vingt.

Au total, vingt échantillons ont été prélevés en mine et trois en laverie, totalisant une centaine de kilogrammes de minerais, pour broyage à la halle de minéralurgie du BRGM (novembre 1997) et analyses (janvier 1998) pour Pb, Zn, Cu, Sb, As, Ba, Si, Ag, et (deux échantillons, n° 8 et 9) pour Au, assorties de la confection de 8 lames minces et de 20 sections polies. Les résultats, déjà communiqués au CCSTI en mai 1998, sont commentés ci-après. On trouvera les tableaux de chiffres bruts, les conditions d'analyse et les limites de dosabilité dans l'annexe 1.

3.2. SITUATION DES ECHANTILLONS ANALYSES

La localisation des échantillons est détaillée dans le tableau 1.

Site d'échantillonnage	N° de prélèvement	Point échantillonné	Partie du filon, faciès	N° d'échantillon	Poids broyé et quarté	Puissance correspondante	Analyse chimique	Section polie	Lame mince
Salle des Roues	Grab sample 1 (fig. 9)	Pilier	zone de teneur moyenne en apparence	0-A et 0-B	14 kg	1 m (ou + au toit)	1	2	
			bande massive riche	1	25 kg	0,30 m	1	1	
			zone stérile à filonnets	2	11,5 kg	1 m	Λ	1	
			bande riche inférieure	3	12 kg	1,5 m	Λ	1	
			zone pauvre	4	5,5 kg	1 m (ou + au mur)	Λ	1	
		Attaque au feu	Quartzites chauffés	5-A et 5-B		ponctuel dans la masse			2
		Hors de la zone de l'attaque au feu	quartzite sain, de référence	6		id°			1
	Attaque au feu	minerai chauffé	7-A et 7-B		id°		1	1	
Echantillons de L. Granger		Torrent du Fournel	Gal. de recherche de la Rive droite	8	1 kg	0,1 m	1	1	
			Affleurement rive droite du torrent, en aval des travaux	9	1 kg	0,1 m	1	1	
Saint-Roch	Grab sample 2 branche du Toit (fig. 10)	Travaux modernes recoupant les travaux médiévaux	Zone stérile	10		0,50 m	1		1
			Zone pauvre	11		0,60 m	1	1	
			Zone massive	12		0,10 m	1		1
			Zone mass. laminée	12 bis		0,02 m	1	1	
			Zone à barytine	13		0,35 m	1	1	1
	Allongement Nord	même galerie, base du Grand Montage	14		0,05 à 0,15 m	1	1		
Rebaisse	Galerie Nord	Bande massive (+ Ba ?)	15			1	1		
	Salle des Dunes	Bande massive à pyrite	16			1	1		
Vieux Travaux	Salle des Perles	bande massive médiévale	17-A et 17 B			1	1		
	Contact du Chaos		minerai massif	18		1	1		
			quartzites de contact	19		1		1	
			schistes du contact	20		1			
Laverie	152	Doly Tub	21		1				
Laverie	300	Bac VI	22		1				
Laverie	719	Chaîne à godets	Milieu du bac	23		1			

Tabl. 1 - Campagne d'échantillonnage à la mine du Fournel, analyses chimiques et déterminations minéralogiques et pétrographiques.

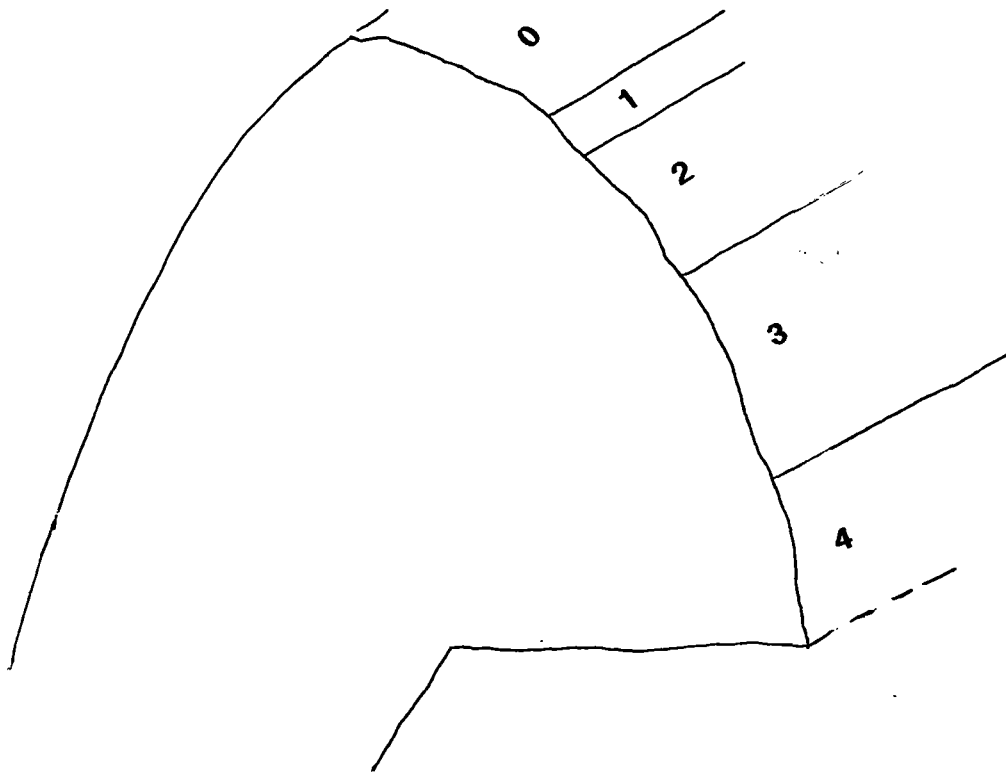


Fig. 9 - Echantillonnage au Fournel (salle des Rouest) : croquis en coupe transversale montrant le plan d'échantillonnage par grab sampling du pilier minéralisé.

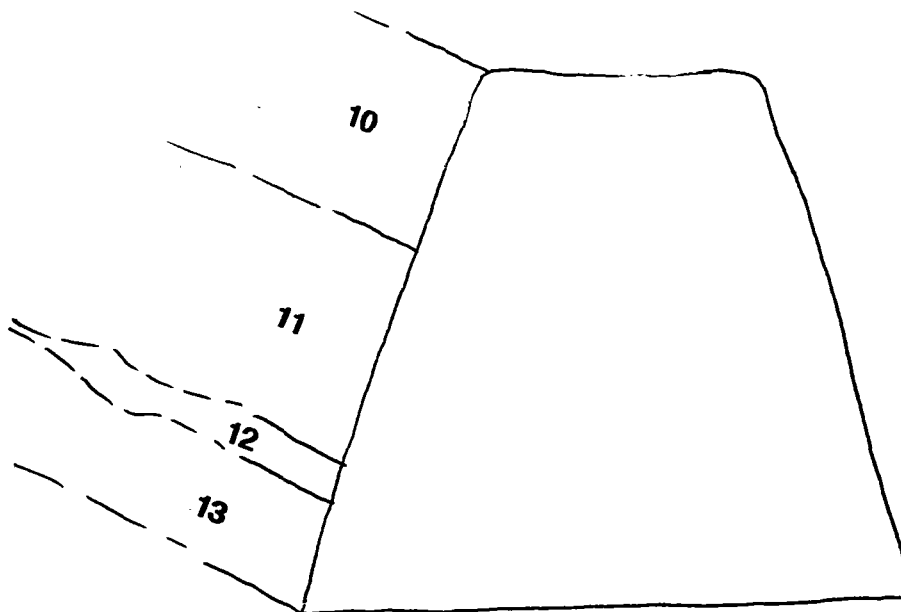


Fig. 10 - Echantillonnage au Fournel (galerie Saint-Roch, branche du Toît, travaux modernes recoupant les travaux médiévaux) : croquis en coupe transversale montrant le plan d'échantillonnage par grab sampling du pilier minéralisé.

3.3. COMMENTAIRES

Les analyses montrent d'abord que dans le pilier résiduel (Salle des Roues) apparaissant à la fois comme le plus puissant et un des plus riches actuellement visibles dans la mine, les teneurs tout-venant en plomb atteignent (aux incertitudes de la méthode d'échantillonnage près) de l'ordre de 5,4 % Pb et 166 g/t d'Ag sur 5 m de puissance visibles (moyenne pondérée simple, sans correction par rapport à la densité vu les incertitudes par ailleurs). Ce pilier a été choisi par le CCSTI pour échantillonnage en raison de sa puissance exceptionnelle et de sa belle apparence au plan teneur. S'il est représentatif de la lentille que les Anciens ont dépilée dans ce quartier de la mine (20000 t de tout-venant ?), on peut dire que cette lentille du point de vue de l'intérêt économique était comparable en puissance et teneur à ce qui a été dépilé en moyenne dans les gisements de Largentière (Ardèche), La Plagne (Savoie), et des Malines (Gard) quoique ce dernier était essentiellement un gisement de zinc. Aujourd'hui (et ce depuis les années 70), ces teneurs seraient considérées comme marginales. A l'époque, elles étaient fort honorables par rapport aux autres mines de France et d'ailleurs.

Mais bien sûr une telle qualité semble avoir été rare dans le gisement du Fournel. Les autres échantillons prélevés montrent un minerai de plus belle teneur que sur ce pilier, mais de puissance bien moindre (de l'ordre de deux à quelques décimètres). On peut noter néanmoins que ces puissances réduites une fois ramenées à une ouverture de caisse filonienne (ou de couche) stérile porteuse ayant un ou deux mètres de puissance correspondent à une minéralisation de même "intensité" peut-on dire que dans la Salle des Roues (de l'ordre de 5 % Pb au mètre de puissance). On doit avoir à l'esprit que les parties les plus riches ont déjà été dépilées.

En outre, il est probable qu'à l'époque de l'exploitation, un tri sélectif à la main en mine puis au jour (scheidage) était effectué par le mineur. Enfin, l'exploitation procédait probablement par abattage sélectif. La teneur du pilier de la Salle des Roues est donc à peu près représentative du meilleur de ce que le gisement peut ponctuellement donner au point de vue géologique, mais les zones anciennement exploitées étaient à la fois plus minces et à plus hautes teneurs en plomb et argent comme l'indiquent les analyses des échantillons n° 12 à 18.

On voit aussi qu'il y a une assez bonne corrélation entre le plomb et l'argent. Le zinc est (sauf exception ponctuelle) relativement peu abondant, ce qui confirme que la blende est exceptionnelle dans le gisement. Parmi les éléments accessoires, le cuivre est presque partout inférieur au pour-cent. L'échantillon le plus riche en argent et en plomb (n° 16) est celui où la minéralisation est aussi la plus riche en cuivre et en antimoine (alors que l'arsenic est en général inférieur à la limite de dosabilité). Ceci suggère qu'en ce point de la mine, outre des sulfo-antimoniures de cuivre et de plomb il y a du cuivre gris porteur d'argent, ce cuivre gris étant surtout antimonieux (variété tétraédrite) alors que la variété tennantite (arsenifère) est rare dans le gisement. Les examens minéralogiques ont permis d'affiner ce diagnostic (cf. chap. 4). L'or a été dosé à tout hasard dans la brèche pyriteuse des échantillons n° 8 et 9 mais les résultats sont négatifs.

4. Etude minéralogique en laboratoire du minerai du Fournel et de sa gangue

Les échantillons prélevés notamment ceux pour analyse chimique ont également été soumis à un examen minéralogique en laboratoire, dont il est rendu compte dans un rapport du BRGM qui constitue une annexe extérieure au présent rapport et qui est référencée comme suit : Marcoux E., Lerouge C. (1998) - Etude minéralogique d'échantillons de l'Argentière-la-Bessée (Hautes-Alpes). Rap. BRGM R 40045, 26 p. ill.

Le but était d'abord de déterminer les différents minéraux présents et par là de localiser les porteurs de métaux utiles (galène, minéraux d'argent), les porteurs mixtes, de métaux utiles et d'éléments non valorisables (les sulfosels par exemple) et les minéraux pénalisants. Ainsi pourrait-on expliquer rétrospectivement les difficultés que la laverie avait pu connaître au cours des différentes périodes d'exploitation de la mine.

L'étude a porté sur 18 échantillons de minerai et 6 échantillons pétrographiques sélectionnés par le CCSTI (B. Ancel). Les observations ont été réalisées au microscope optique par transmission (échantillons de roches) et par réflexion (échantillons de minerais). Les analyses des minerais ont été effectuées à la microsonde électronique du BRGM (Service Minier National, département Procédés, Etudes, Analyses SMN/PEA).

4.1. ETUDE DU MINERAI

Les échantillons analysés montrent pour l'essentiel un minerai plombo-argentifère avec un peu de zinc. Très localement (vieux travaux, salle des Perles), on observe des zones de minerai cuprifère, riche en chalcoppyrite et en cuivre gris. Ces variations de compositions (zones à Pb, Zn, ou Cu) sont communes dans les filons minéralisés ; elles reflètent les variations des conditions physico-chimiques (température, pH) au sein d'un système hydrothermal.

La gangue est essentiellement à quartz et barytine mais plusieurs échantillons dénotent un dépôt de la minéralisation par imprégnations de roches sédimentaires clastiques poreuses (quartier Saint-Roch). La minéralisation a par ailleurs subi des contraintes tectoniques qui l'ont fortement déformée par endroits.

L'argent est le métal valorisant dans ce gisement. La "galène argentifère" dont la littérature parle en abondance n'est pas, dans la majorité des cas, une galène qui contient de l'argent dans son réseau cristallin, mais une galène "normale" riche en inclusions de minéraux d'argent (pyrargyrite, diaphorite, pearcéite, tétraédrite etc.). C'est le cas à l'Argentière où les échantillons montrent deux porteurs d'argent dans la galène : la tétraédrite $(\text{Cu,Ag})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$, et la tennantite, $(\text{Cu,Ag})_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$, c'est-à-dire les deux termes des cuivre gris.

Les analyses à la microsonde montrent que la tétraédrite est le porteur principal avec plus de 15 % d'Ag contenus. La tennantite, beaucoup plus rare, n'a été observée qu'à la Salle des Perles, associée à la tétraédrite (tabl. 2). La galène en elle-même ne montre pas de teneurs significatives en argent, pas plus que la sphalérite, parfois porteuse d'argent (tabl. 2). La pyrargyrite et la freieslébénite (deux sulfosels d'argent), signalées dans l'inventaire minéralogique de la France de Roland Pierrot et coll., n'ont pas été observées sur les échantillons étudiés.

Il est intéressant de noter que la galène est cependant riche en minéraux de Sb et As (boulangérite, $Pb_5Sb_4S_{11}$, et géocronite, $Pb_5[Sb,As]_2S_8$) ce qui confirme le caractère antimonifère des fluides.

Site du prélèvement et numéro d'échantillon	section polie n°	galène	sphalérite	pyrite	chalcopryrite	tétraédrite	géocronite	autres
Fournel Salle des Roues 0-A	54212	AA	F	F		R	R	R boulangérite
Fournel Salle des Roues, 0-B	54213	AA	F			R	R	
Fournel Salle des Roues, 1	54214	A		F		F	FR	
Fournel Salle des Roues, 2	54215	R		T				
Fournel Salle des Roues, 3	54216	A				R	F	
Fournel Salle des Roues, 4	54217	AA		F			F	
Fournel Salle des Roues, 7-B	54218	A		F		F	A	A boulangérite
ravin du Fournel, 8	54219	R		AA				
ravin du Fournel, torrent, 9	54220			AA				
St Roch, pilier, 11	54221	A	F	R				
St Roch, pilier, 12	54222	A	A			A		
St Roch, pilier, 13	54223	A	F			F		
St Roch allongement nord, 14	54224	A	A	A		A		
Rebaisse, galerie nord, 15	54225	AA	F			F		
Rebaisse, Salle des Dunes, 16	54226	AA	A	R		F		
Vieux Travaux, Salle des Perles, 17-A	54227	R	F	F	AA	A		
Vieux Travaux, Salle des Perles, 17B	54228	AA	AF			RF	RF	R boulangérite F tennantite
Vieux Travaux, contact du Chaos, 18	54229	AA	A			F		

AA : minéral dominant ; A : abondant ; F : fréquent ; R : rare ; T : trace

Tabl. 2 - Mine du Fournel, paragenèses des échantillons observés.

4.2. DESCRIPTION PETROGRAPHIQUE DES LAMES MINCES DE GANGUE

On a examiné différents échantillons de quartzite du Trias et de faciès silico-barytique de la zone filonienne. En outre, des échantillons prélevés aux parements de la galerie creusée au feu par le CCSTI ont été examinés pour rechercher d'éventuelles transformations pétrographiques. Les résultats sont les suivants.

• **Echantillon n° 5-AB (C25053) : quartzite**

Description

Roche constituée essentiellement de quartz hétérogranulaire dans un ciment quartzeux, de rares éléments lithiques à séricite + opaques + quartz et de rares zones opacifiées cryptocristallines.

Minéralogie

Quartz essentiellement, carbonates rares, mica blanc fin rare, opaques rares, un grain de zircon, barytine rare.

Zones opacifiées cryptocristallines indéterminées.

• **Echantillon n° 6 (C25054) : quartzite à barytine disséminée**

Description

Roche constituée de quartz hétérogranulaire dans un ciment quartzeux.

Barytine disséminée le long des joints de grain.

Rares petites zones opacifiées (< 250 microns) à phyllites + opaques fins ± quartz.

Minéralogie

Quartz, opaques fins, mica blanc fin, barytine relativement abondante.

• **Echantillon n°-7 (C25055) : quartzite à opaques**

Description

Roche constituée essentiellement de quartz hétérogranulaire dans un ciment quartzeux microcristallin, et de rares petites zones opacifiées riches en opaques fins.

Opaques disséminés, localisés dans les joints de grains ponctuellement dans la roche, en association avec le quartz microcristallin, à la barytine et au mica blanc.

Veinules de barytine + opaques ± quartz recoupant la roche, et parfois associées à des petites zones opacifiées cryptocristallines.

Minéralogie

Quartz, opaques, mica blanc fin rare, barytine abondante localement.

Zones cryptocristallines indéterminées, riches en impuretés.

N.B. Le passage au feu réalisé sur ces 2 échantillons n'a pas amené de perturbations visibles au microscope de la structure ou de la composition cristalline.

• **Echantillon n° 10 (C25056) : quartzite à muscovite repris par une zone à barytine (veine ou niveau?)**

Description

Contact entre :

1. un quartzite constitué de quartz hétérogranulaire dans un ciment à quartz microcristallin et mica blanc fin et,
2. une zone à barytine massive.

Le contact n'est pas franc. La barytine, en s'éloignant de la zone massive, semble imprégner le ciment du quartzite. La zone à barytine et le contact barytine/quartzite sont affectés par une déformation cisailante intense locale (pourrait correspondre à un dépôt de la barytine synchrone d'un micro-cisaillement ?).

Minéralogie

Quartz, barytine, mica blanc.

• **Echantillon n° 12 (C25057) : minerai**

Description

Roche constituée de reliques de quartzite à traces de mica blanc fin, intensément déformé (cisailé) et injecté de minerai : opaques + sphalérite? + barytine.

Minéralogie

Quartz, barytine, opaques, sphalérite?, mica blanc fin.

• **Echantillon n° 19 (C25058) : quartzite à mica blanc et tourmaline**

Description

Roche constituée de grains de quartz essentiellement et de rares petits éléments polycristallins quartzeux dans un ciment rare à quartz microcristallin + mica blanc fin + barytine + opaques fins. La barytine et la tourmaline sont localement associées. Il semblerait qu'elles soient contemporaines et secondaires à la formation du quartzite.

Minéralogie

Quartz, mica blanc fin, barytine, tourmaline, rares opaques fins.

5. Listage des études nécessaires et des perspectives de partenariats

A l'issue de la première campagne, une liste d'études complémentaires envisagées par les archéologues, a été jointe au rapport BRGM R 39901. A l'issue de la seconde campagne, cette liste peut être complétée par d'autres études s'avérant aussi utiles ou nécessaires, qui sont les suivantes.

5.1. LISTAGE DES ETUDES RESTANT NECESSAIRES

5.1.1. Travaux de géologie régionale

- Dessin d'une carte régionale des gîtes de cuivre, et d'une carte des gîtes de plomb et d'argent (les âges respectifs des vestiges archéologiques d'exploitations ou de métallurgie seront fournis par la DRAC et reportés par le BRGM sur la carte au moyen de signes ou de surcharges), édition.
- Option : cette carte consultable sur Géorama (mini-SIG. interactif ludique sur CD-ROM, avec tables attributaires pour chaque gîte donnant diverses caractéristiques).
- Expertises structurales (à la mine de cuivre de Saint-Véran sur tous les niveaux de la mine, au Fournel pour des coupes transversales, à la mine de graphite du Chardonnet) chacune devant aboutir à des documents utilisables pour une synthèse pédagogique ; pour cela, il est notamment nécessaire au Fournel de réaliser un nivellement des galeries des divers quartiers de la mine, continuer les relevés géologiques et structuraux (orientations des veines minéralisées, limite schistes-quartzites, jeu des failles). Après report sur les plans des divers quartiers de la mine remis à la même échelle, il sera possible de réaliser les coupes géologiques E-W et N-S qui permettront vraisemblablement de réaliser un ou plusieurs blocs diagrammes de l'exploitation.
- Rédaction d'une monographie géologique du gisement de Saint-Véran et du gisement du Fournel, à plusieurs niveaux de lecture et illustrée en couleurs, édition.
- Participation à l'architecture et lancement d'une Banque des données archéologiques de différents sites, ou par département, sur le modèle borne de consultation SIPAGA d'Aquitaine.

5.1.2. Travaux de modélisation géométrique en 3 dimensions (mine de Saint-Véran, mine du Fournel): Réalisation d'un bloc diagramme 3-D informatisé pour kiosque

La réalisation de ce modèle géométrique 3D s'inscrit dans le cadre du projet de mise en place d'un bloc diagramme 3D informatisé pour un kiosque, présentant à la fois l'intérêt d'un site de visualisation très ludique manipulable par les visiteurs du musée et celui d'un outil pour les scientifiques.

Les archéologues ont d'abord envisagé de travailler sur Adobe Acrobat qui a de multiples avantages notamment son coût. Mais il s'agit seulement d'un logiciel de dessin, qui ne permet donc pas de visualiser une mine en trois dimensions de façon interactive. Il peut fournir seulement des présentations statiques de plusieurs vues sous la forme de blocs diagrammes classiques.

Il est proposé par le BRGM, comme produit final, un modèle géométrique 3D (cf. ann. 1) au format VRML (Virtual Reality Modeling Language). Issu du monde Internet, ce format présente l'intérêt d'être un standard de la représentation d'objet 3D. Des visualiseurs de ce format VRML sont disponibles dans le commerce à des prix très raisonnables sur des plates-formes PC Windows 95 ou NT(cf. ann.).

Il est à noter qu'un modèle 3D est souvent difficile à appréhender pour une personne qui ne connaît pas particulièrement l'objet modélisé. Il serait donc souhaitable de présenter la mine sous plusieurs de ses aspects à travers des habillages différents du modèle :

- historique des travaux miniers,
- structure géologique.

La décomposition en plusieurs modèles présente d'autre part l'intérêt de disposer de modèles d'une complexité réduite permettant ainsi une manipulation aisée (rapide) dans le visualiseur.

L'intégration des données géologiques présentera d'autre part un intérêt scientifique en permettant d'affiner l'interprétation structurale.

a) Données d'entrée nécessaires

Topographie de surface

Travaux souterrains

Les données recueillies ont été traitées avec le logiciel TOPOROBOT et sont exportables sous forme de fichier "Texte". Ces données comprennent également les sections des travers-bancs. Par contre, les chantiers d'exploitation ne sont pas levés précisément et nécessiteront certainement un levé complémentaire.

b) Géologie

Réalisation des modèles 3D

Plusieurs phases de modélisation peuvent être distinguées d'une part selon l'aspect considéré (travaux/géologie) et d'autre part selon l'état des connaissances (données disponibles/futures).

Ce travail pourra être réalisé à l'aide du logiciel STRIM (modeleur 3D de MatraDatavision utilisé par le BRGM) permettant l'export au format VRML.

Une part importante du travail à réaliser sera certainement la mise en cohérence des divers systèmes de coordonnées utilisés.

Modèle préliminaire des travaux

- Modélisation de la surface topographique à partir de la carte disponible.
- Modélisation sommaire des infrastructures principales (rivières, routes, rails, bâtiments, haldes) permettant à l'utilisateur de se repérer dans l'espace.
- Modélisation des travers-bancs.
- Reconstitution linéaire des cheminements du levé topographique à partir des données TOPOROBOT.
- Reconstitution linéaire de l'axe des galeries (le cheminement topographique n'est pas réalisé dans l'axe des galeries).
- Modélisation surfacique en prenant en compte les données des gabarits.
- Modélisation des chambres d'exploitation avec les données disponibles à ce jour..

Les ouvrages modélisés peuvent être affectés d'une couleur particulière pour chaque période d'exploitation.

A l'issue de cette première phase, il sera défini un programme complémentaire de topographie pour lever les imprécisions, notamment au niveau des chambres d'exploitation.

Modèle final des travaux

Cette finalisation prendra en compte le complément de levé topographique pour l'affinement du modèle dans les zones de chantiers.

Modèle préliminaire de la géologie

Il faudra définir au préalable les unités géologiques qui seront modélisées, une simplification de la géologie est en effet nécessaire pour que le modèle soit pédagogique.

- Modélisation de la géologie de surface.
- Visualisation des travers-bancs reconnus avec des couleurs différentes selon les unités géologiques (5 à 6 unités).

Modèle final de la géologie

Cette phase nécessite des compléments de levés des travers-bancs ainsi qu'un travail d'interprétation structurale. Le modèle final présente les enveloppes des unités géologiques simplifiées.

c) Possibilités d'évolution dans le futur

Le modèle 3D offre d'autres possibilités d'utilisation ; il peut servir notamment de base pour des applications de réalité virtuelle.

Sous-traitance d'un scénario de cheminement dans les galeries du modèle (coût approximatif : 150 à 200 kF HT)

Trois possibilités de visualisation sont offertes :

- restitution sous la forme d'une cassette vidéo ;
- location matériel interactif ;
- achat du matériel (station de travail, logiciel, casque, etc.).

5.1.3. Relevés géophysiques à Saint-Véran pour recherche de galerie et interprétation

Il s'agit de localiser d'anciennes galeries d'exploitation d'une colonne de bornite massive et peut-être cuivre natif dans un environnement de quartzite, schistes lustrés et cipolin.

Nous proposons deux groupes de méthode qui s'appliqueront :

- d'une part, à rechercher les galeries ou fosses remblayées ou vides par microgravimétrie et géoradar ;
- d'autre part, à localiser les filons ou ce qu'il en reste par magnétisme, électrique, polarisation provoquée et éventuellement radiométrie puisque de l'uraninite a été identifiée dernièrement dans le minerai.

Dans le cas où le premier groupe de méthodes ne donnerait pas de réponse le deuxième groupe permettrait d'implanter le ou les forages de contrôle qui permettront de confirmer qu'il n'y a pas d'exploitation.

Il est proposé de couvrir un rectangle de 80 par 100 m au moyen de 5 profils de 100 m espacés latéralement de 15 m dont un profil sera prolongé de 50 m pour étalonnage sur des structures connues, soit un total de 550 m linéaires. Le pas de mesure est de 2 m en raison des dimensions très faibles de la galerie et/ou du filon recherché (puissance de l'ordre du mètre et peut-être moins) ce qui nécessite un nombre important de mesures.

L'ajout, à chaque station, d'une mesure par polarisation spontanée (PS) serait également pertinente mais elle sera reculée à une phase ultérieure s'il est vérifié que des niveaux de schistes graphiteux sont présents (qui peuvent donner une réponse PS semblable à celle du gisement, et qui ont été soupçonnés par les géophysiciens qui ont fait les premières campagnes sur la mine). La présence de graphite n'est pas mentionnée dans la thèse de Cl. Ayoub (1984) et il importera de la vérifier par des prélèvements assortis de déterminations pétrographiques.

5.1.4. Essais en laboratoire et bio-traitement du minerai de Saint-Véran

Les archéologues miniers envisagent le concours du BRGM pour un travail complémentaire à l'étude de paléominéralurgie de Christophe Marconnet (1997-1998) sur les sables de laverie du Fournel et sur d'autres sites de métallurgie (déterminations RX, analyse chimique, évaluation économique rétrospective des procédés anciens).

Ils s'interrogent aussi, à Saint-Véran, sur les techniques employées aux temps anciens (Préhistoire, Moyen Âge) pour le traitement d'une partie du minerai, et notamment sur l'éventualité de tentatives de biolixiviation archaïque. Compte tenu des éléments à notre disposition et de l'expérience du BRGM, il est proposé le programme de travail suivant, comportant plusieurs phases classées par ordre de priorité.

a) Tests de biolixiviation des échantillons provenant de la mine, à l'échelle du laboratoire

Ces tests consistent à évaluer le caractère biodégradable des matériaux sulfurés, en présence de populations microbiennes disponibles au BRGM. Ils sont réalisés dans des tubes agités et aérés permettant la mise en contact, en phase liquide, entre un minerai et une culture bactérienne. Le minerai est mis en pulpe dans une solution nutritive favorisant la croissance des bactéries. Pour se multiplier, les bactéries utilisent les sulfures comme source d'énergie provoquant la destruction de la matrice sulfurée et permettant ainsi la solubilisation des métaux contenus dans celle-ci.

Nous disposons à l'heure actuelle au laboratoire de deux types de cultures bactériennes particulièrement adaptées à la "biolixiviation" des minerais sulfurés : des cultures

mésophiles se développant à 35°C, et des populations thermophiles dont les températures optimales de croissance sont situées entre 50°C et 80°C.

Informations générales sur ces tests :

- Durée des tests : 4 à 5 semaines (plusieurs tests peuvent être effectués simultanément). En ce qui concerne le planning de réalisation, il faudra compter 15 jours à 3 semaines de plus pour la remise du rapport).
- Suivi analytique : dosage du cuivre et du fer par spectrométrie d'absorption atomique, comptage bactérien, suivi des pH et des potentiels d'oxydoréduction des solutions.

b) Isolement de cultures bactériennes sur site avec mise en culture au BRGM

Dans l'hypothèse où la biolixiviation aurait été appliquée à l'époque préhistorique, des souches autochtones au site auraient probablement été utilisées. Il serait intéressant de déterminer si des populations bactériennes capables de biolixivier la bornite, en conditions mésophile ou thermophile, sont actuellement détectables dans la mine. Pour cela, il faudrait organiser une mission au cours de laquelle des prélèvements seraient effectués sur le site. Ces échantillons seraient ensuite mis en culture dans différentes conditions de température, à Orléans.

c) Bilan d'oxydation bactérienne d'un échantillon

Si les phases a et b ont fourni des résultats positifs, il peut être intéressant de réaliser un test de biolixiviation sur un échantillon de minerai de 1 à 10 kg, afin d'obtenir un bilan complet (cuivre, fer, soufre). Les produits issus de cet essai pourraient être récupérés afin de tester les étapes ultérieures du traitement, qui devraient conduire à la récupération du cuivre.

5.2. LISTAGE DES PARTENARIATS ENVISAGEABLES

Il a été rendu compte à la réunion du comité de pilotage du 27 novembre 1998 à Marseille des recherches de partenariats effectuées par le BRGM pour permettre la mise en oeuvre des travaux nécessaires à la continuation du projet. Ces recherches se poursuivent en 1999.

Les deux campagnes réalisées par le BRGM en appui aux archéologues, à la DRIRE et à la DRAC ont permis de dégager, au-delà de l'intérêt archéologique ou muséologique des sites dont l'appréciation est du ressort de la DRAC, un intérêt patrimonial certain de plusieurs sites au plan géologique, pédagogique, touristique.

Ceci permet d'argumenter une action conjointe de la DRIRE, de la DRAC et du BRGM auprès des collectivités territoriales de la région PACA, auprès de régions qui ont des possibilités minières similaires (Corse) et/ou auprès de partenaires européens (Sardaigne, Espagne, Portugal) dans une perspective de valorisation multithématique des sites qui le méritent. Les expériences de Géo-Parcs envisagées en Sardaigne et au Portugal avec la collaboration d'INTERREG et de l'UNESCO sont examinées et des contacts exploratoires prévus.

La possibilité d'un partenariat avec l'Education Nationale et la Recherche en région PACA sera aussi examinée, en axant la coopération des partenaires actuels et futurs du projet sur le thème rassembleur d'une innovation pédagogique de portée régionale, qui pourrait être pilote.

Il est envisagé de proposer aussi d'utiliser pour cette valorisation les avantages d'Internet.

Conclusion

Durant la campagne 1998, le BRGM a eu deux actions principales.

Il a apporté un appui à la DRIRE, à la DRAC et aux archéologues miniers lors de la procédure d'abandon de diverses concessions :

- en fournissant aux archéologues la documentation souvent difficile d'accès (littérature grise) qui leur manquait sur les anciens sites miniers, leur géologie, l'histoire de leur exploitation ;
- en apportant sa compétence pour exécuter des études spécifiques que ce soit sur le terrain (analyse structurale) ou en laboratoire (analyses chimiques, pétrographie, minéralogie des minerais) qui complètent les fouilles archéologiques et les éclairent ;
- en assurant sur les sites une expertise sécuritaire visant à prévenir les risques d'accident durant les fouilles et l'accès du public non autorisé et/ou non compétent en spéléologie minière.

Il a exploré avec ses partenaires les perspectives par lesquelles les études pourraient se poursuivre, restant dans le cadre de l'appui aux archéologues mais débordant sans doute plus largement de la mise en valeur multithématique des sites miniers anciens, puisqu'à la fois :

- économique (touristique) ;
- culturelle, pédagogique et scientifique (muséologie, archéologie, ethnologie, Histoire des techniques, enseignement, recherche, etc.) ;
- et patrimoniale (géologie, minéralogie, Histoire des sciences).

Bibliographie

- Ayoub Cl. (1984) - Un exemple de minéralisation associée aux ophiolites mésozoïques des Alpes Cottiennes : le gîte de Saint-Véran (Hautes-Alpes, France). Etude pétrographique, structurale et métallogénique. Thèse doct. spéc. Géol. app., Univ. scient. méd. Grenoble, 207 p. ill.
- BRGM (1992) - Ressources minières françaises : tome 1 (nouvelle édition) - Les gisements de plomb-zinc (situation en 1991). Rapport BRGM, Comité de l'Inventaire des Ressources Minières Métropolitaines, 276 p. ill.
- BRGM. (1996) - Inventaire de cinq concessions minières orphelines dans le département du Var (fiche programme 96G323). Rapport BRGM R 38932, juin 1996.
- BRGM (1997) - Etude géologique et structurale de l'ancienne mine de plomb argentifère du Fournel à l'Argentière-la-Bessée (Hautes-Alpes). Rapport BRGM R 39624, juillet 1997.
- BRGM (1997) - Appui aux administrations, aux archéologues et aux collectivités pour les procédures d'abandon de concessions minières et leur revalorisation touristique en Région Provence-Alpes-Côte d'Azur : rapport de la campagne 1997. Rapport BRGM R 39901.
- Forte A.(1996) - Riconversione dello stabilimento dell'acido solforico di Monteponi-Iglesias in struttura ricettiva. Progetto di Andrea Forte, ingegnere, presentato al Congresso internazionale per il Centenario dell'Associazione Mineraria Sarda 1896-1996, Sessione IV, Iglesias, 12-13 Ottobre 1996. Rapport inédit, 18 p., ill.
- Gaillard J.-Cl. (1961) - Etude géologique et métallogénique de la région de La Garde-Freinet - Plan de la Tour (Massif des Maures). Thèse Doct. 3^o Cycle, Lab. Géol. appl. Univ. Paris.
- Gutherz X., Barge H. (1998) - La mise en sécurité des mines en région PACA. Revue du Syndicat National des Ing. de l'Industrie et des Mines (SNIIM), n^o 25, p. 43-46.
- Labaume P., Ritz J.F., Philip H. (1989) - Failles normales récentes dans les Alpes sud-occidentales : leurs relations avec la tectonique compressive. Comptes Rendus Acad. Sci. Fr., Sér. 2, 308, n^o 17, p. 1553-1560.
- Leistel J.M., Marcoux E., Thiéblemont D., Quesada C., Sánchez A., Amodóvar G.R., Pascual E., Sáez R. (1998) - The volcanic-hosted massive sulphide deposits of the Iberian Pyrite Belt. Mineralium Deposita, 33, p. 2-30.

- Marcoux E., Lerouge C. (1998) - Etude minéralogique d'échantillons de L'Argentière La Bessée (Hautes-Alpes). Rap. BRGM R 40045, 26 p.
- Moïsseff A. (1960) - Rapport de mission sur la concession de Valaury. Rapport interne Cie Royale Asturienne des Mines, 13.8.1960 (*in* intercalaires non informatisés de l'original du fichier des Gîtes Minéraux de la France de la BSS, archives Dépt SGN/SIA, BRGM Orléans).
- Morin D., Rosenthal P., Faivre A. (1997) - Projet collectif de recherche " Mines et métallurgie du fer en Provence et dans les Alpes du Sud ", rapport annuel. *In* : Bilan scientifique 1996 du Service régional de l'Archéologie de la DRAC de Provence-Alpes-Côte-d'Azur, éd. Min. Culture, D^{on}. du Patrimoine, S/D^{on} de l'Archéologie, p. 176-177.
- Pelizza S., Bajzelj U. ed. (1996) - Sardegna mineraria dal II al III Millenio : miniere, cave, ambiente. Atti del Congresso internazionale per il Centenario dell'Associazione Mineraria Sarda 1896-1996, Sessione IV, Iglesias, 12-13 Ottobre 1996. Un vol. 200 p. ill.
- Pierrot R., Picot P., Poulain P.A. (1972) - Inventaire minéralogique de la France : les Hautes-Alpes (05). Orléans, BRGM, 184 p.
- Soléty P. (1966) - Les gisements de fluorine de la Provence cristalline (Maures, Tanneron, Estérel). Mémoire BRGM n° 39, 262 p. ill.
- Tricart P. (1980) - Tectoniques superposées dans les Alpes occidentales, au Sud du Pelvoux. Evolution structurale d'une chaîne de collision. Thèse Doct. Etat Sc. nat., Univ. Strasbourg, 407 p.
- Vervialle J.-P. (1975) - Les minéralisations filoniennes à barytine, fluorine, plomb et zinc du socle hercynien des Maures orientales, de l'Estérel et du Tanneron. Doct. Spéc. Gîtologie, Fac. Sci. Univ. Orléans.

Photographies

(mine du Fournel)

NW



SE

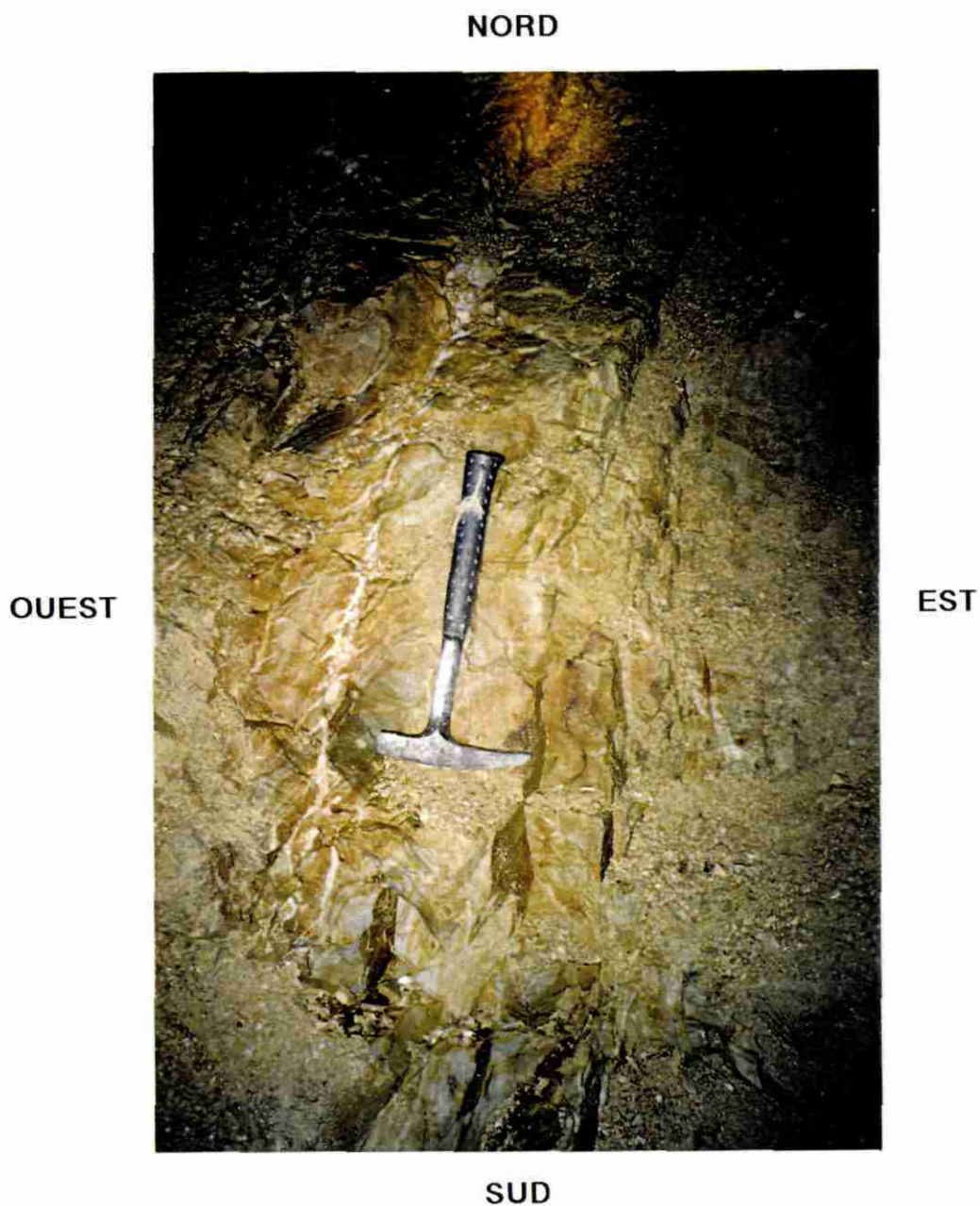
*Ph. 1 - Mine du Fournel, veine minéralisée et faillée
(station n° 49 B, Travaux Saint-Roch).*

W

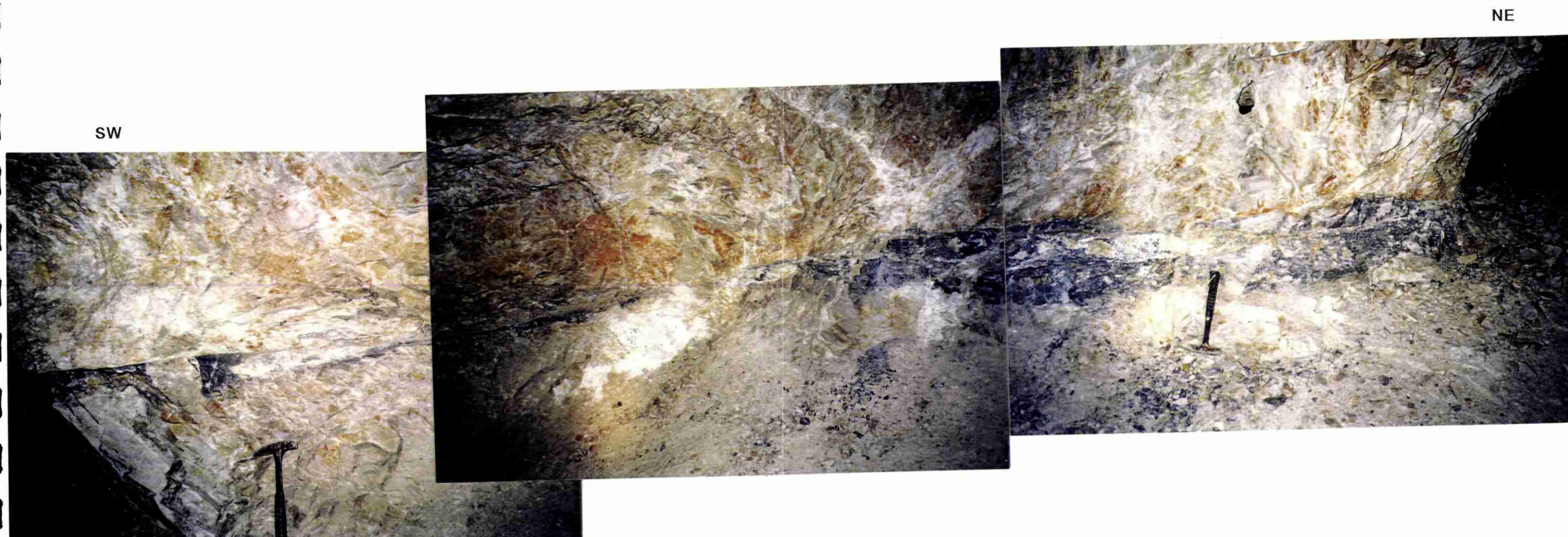


E

Ph.2 - Veine minéralisée : galène et quartz (station n° 48, Saint-Roch).



Ph. 3 - Stratification des quartzites, ayant (re)joué en cisaillement dextre (fentes à quartz, en échelon). plancher de galerie montante (station n° 49 A, Saint-Roch).



Ph. 4, 5 et 6 - Vues de la veine minéralisée (Q + Ga) et faillée (stations n° 54 A, B et C, Saint-Roch).



Ph. 7 - Veine minéralisée (Q + Ga) recoupée et décalée par une petite faille tardive ramifiée (station n° 54 D, Saint-Roch).



Ph. 8 - Faille N - S subverticale (cascade) affectant les bancs de quartzites à schistosité de fracture fruste (station n° 87 B, rive droite du torrent du Fournel).

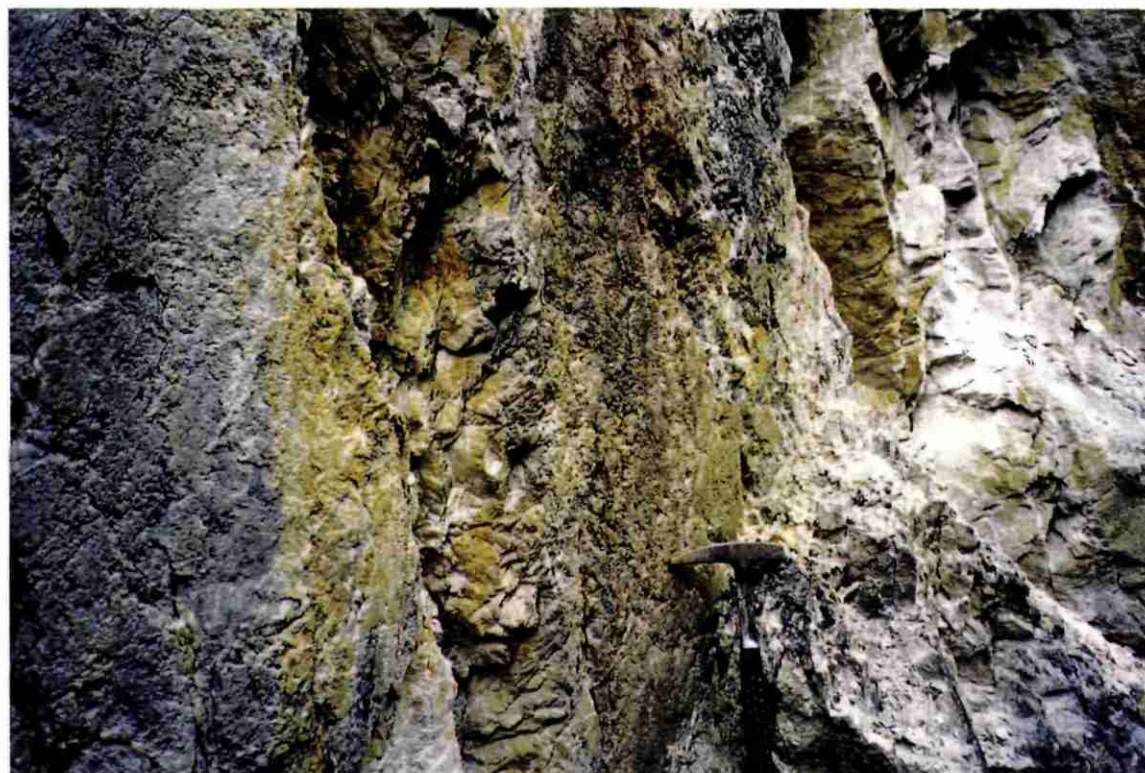
N



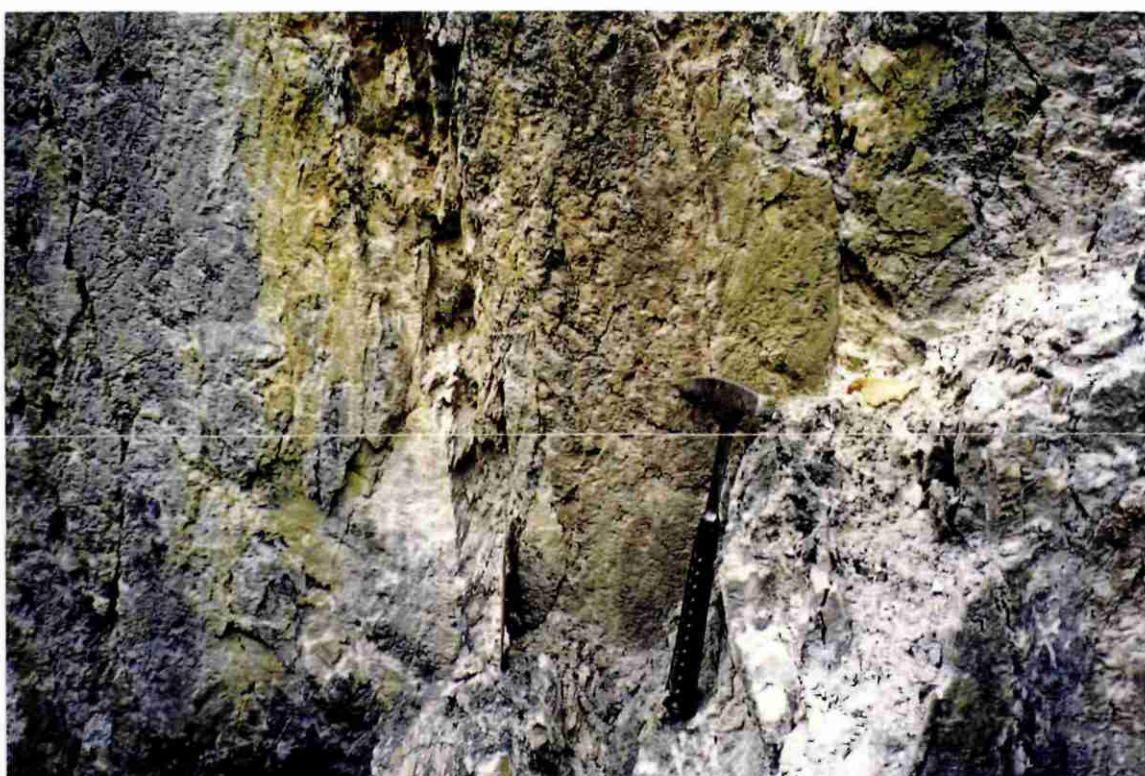
S

*Ph. 9 - Veines à pyrite, N-S subverticales
(station n° 98, rive droite du torrent du Fournel).*

EST



*



*

**

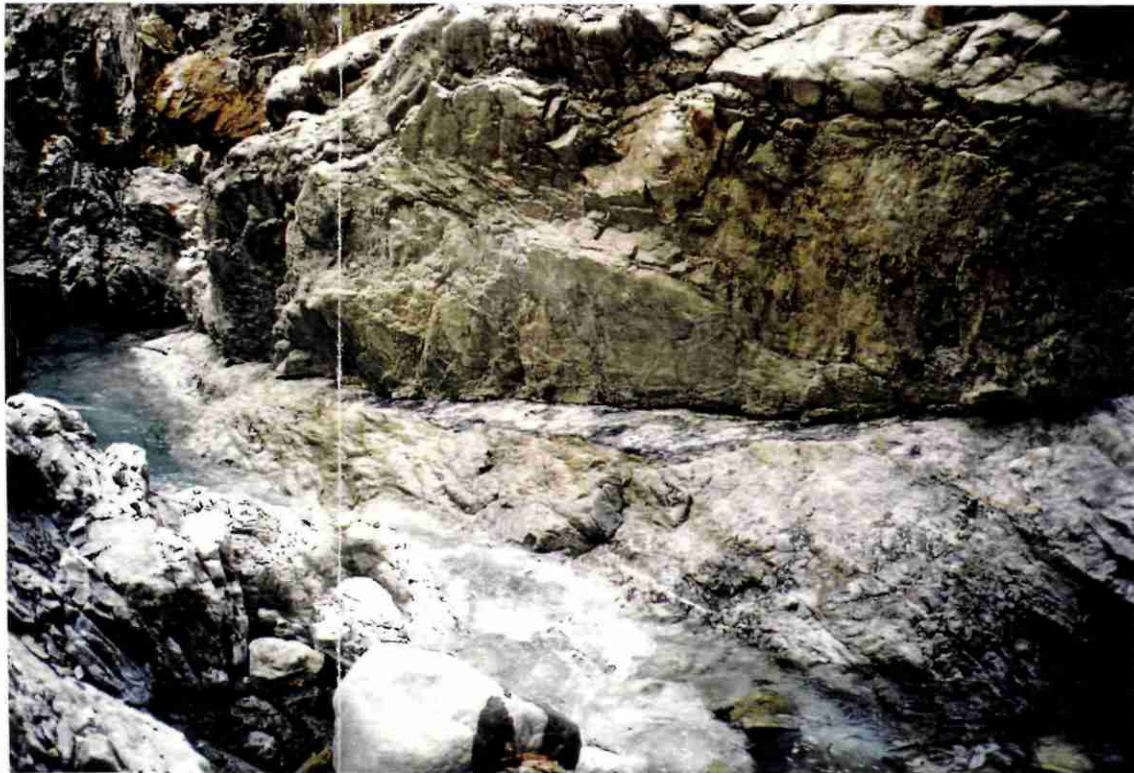


**

OUEST

Ph. 10, 11 et 12 - Vues du nord-est, du nord puis du nord-ouest d'une petite veine à pyrite, décalée par des failles NNW-SSE dextres (station n° 95), rive droite du torrent du Fournel.

SE



NW



*Ph. 13 et 14 - Veine à galène et quartz, peu inclinée et affectée par une faille parallèle
(station n° 100, rive droite du torrent du Fournel).*

ANNEXE 1

**Tableau des analyses chimiques
(mine du Fournel)**

Chef du département: **JF.SUREAU**
 Resp. groupe ANALYSE: **AM.FOULLAC**
 Correspondant Qualité: **F.AUGUSTIN**
 Coordination des analyses: **Ph.DEGRANGES**

Responsables unités:
 - Chimie minérale: **A.BATEL**
 - Chimie eaux et organique: **R.JEANNOT**

RAPPORT D'ANALYSES

Demandeur	FERAUD
	SMN/DEX/CTTM
Provenance des échantillons	98G502
Nature des prélèvements	
N° ANA	E6006A
N° de demande	98600625
Affiliation	
N° de compte	10423

Laboratoire **Analyse chimique élémentaire**

Responsable **D. MARTINEAU**

Laboratoire **Analyse chimique or**

Responsable **T. LAURIOUX**

Téléphone : (33) 02 38 64 30 17

Télécopie : (33) 02 38 64 39 25

Résultats certifiés par le(s) responsable(s) de laboratoire le : 14-MAI-98

Visa **Ph.Dégranges**



->-> ATTENTION AUX INFORMATIONS PORTEES PAGE(S) SUIVANTE(S).

Les résultats exprimés ne concernent que les échantillons soumis à essais.
 La reproduction de ce rapport d'essais n'est autorisée que sous sa forme intégrale.

Nb Pages ... 7

BRGM

3, avenue Claude Guillemin, Orléans-La Source - 45060 Orléans cedex 2, France
 Tél. : 02 38.64.30.17 - Téléc : BRGM 780258 F - Télécopieur : 02 38.64.39.25

Les analyses suivantes ont été réalisées dans le laboratoire : **Analyse chimique élémentaire**

Le mode opératoire **MO00C**
est utilisé pour doser :

Arsenic

Le mode opératoire **MO07**
est utilisé pour doser :

Analyses Ag-Ba-Cu-Fe-Pb-Sr-Zn (AA); Cl(potentio); Fe(volu); S-So-SO4-St-Ba(gravi).

Argent **Baryum**
Zinc **Zinc**

Cuivre **Plomb** **Plomb**
Cuivre

Le mode opératoire **MO009**
est utilisé pour doser :

Analyse des Roches Al-Ca-Fe-K-Mg-Mn-Na (AA); Ca-Mg-FeO (volu); F-Cl (pot,Iono); SiO2 (colo); Ct-St (Leco)

Silicium

Le mode opératoire **MO031**
est utilisé pour doser :

Dosage de l'Antimoine dans les roches (AA) et minerais (volumétrie).

Antimoine **Antimoine**

UNITES : g/t = gramme par tonne = mg/Kg = ppm

Les analyses suivantes ont été réalisées dans le laboratoire : Analyse chimique or

Le mode opératoire MO024 Dosage de l'Or (LD 20 ou 100mg/t) par AA pour la Géochimie

est utilisé pour doser :

Or 20ppb

METHODE : La mise en solution est effectuée par attaque de l'échantillon avec un mélange acide (HCl+HNO₃+HF). L'or est ensuite extrait en milieu MIBK. L'analyse est faite dans cette phase par absorption atomique.

RESULTATS : Les résultats sont exprimés en valeur pondérale sur produit brut. Une valeur égale à la limite supérieure de dosabilité doit être considérée comme supérieure ou égale à cette limite.

Identification	Unité	Argent	Arsenic	Or 20ppb	Baryum	Cuivre	Cuivre	Plomb
		g/t	%	mg/t	%	%	g/t	%
Labo	Client	LDI	LDS					
		5.	0.05	20.	0.05	0.01	20.	0.05
		10000	100	5000	100	100	5000	100
1	0	400.	< 0.05		7.90		45.	10.50
2	1	295.	< 0.05		1.85		35.	10.45
3	2	30.	< 0.05		1.25		25.	1.20
4	3	190.	< 0.05		12.30		70.	7.00
5	4	80.	< 0.05		0.10		990.	0.65
6	8	60.	0.05	< 20.	0.15		115.	
7	9	< 5.	< 0.05	< 20.	4.10		< 20.	
8	10	5.	< 0.05		5.95		< 20.	
9	11	50.	< 0.05		5.15		35.	1.50
10	12	295.	< 0.05		34.80		410.	9.00
11	12bis	365.	< 0.05		34.90		440.	11.55
12	13	425.	< 0.05		16.20		320.	15.90
13	14	585.	< 0.05		10.80		880.	18.80
14	15	625.	< 0.05		21.15		590.	18.65
15	16	1440.	0.30		9.75	3.25		28.65
16	17	500.	< 0.05		26.90		1090.	16.70
17	18	920.	< 0.05		1.25		1200.	22.20
18	19	7.	< 0.05		0.30		< 20.	
19	20	7.	< 0.05		0.40		< 20.	
20	152	1060.	< 0.05		18.10		680.	44.50

Identification		Unité	Plomb g/t	Antimoine %	Antimoine g/t	Silicium %	Zinc %	Zinc g/t
Labo	Client	LDI	5000	100	5000	100	100	5000
1	0				530.	30.80		870.
2	1				260.	35.50		60.
3	2			<	50.	44.00		50.
4	3				270.	30.70		880.
5	4				420.	45.20		160.
6	8	1440.			170.	34.50		100.
7	9	100.		<	50.	41.40	<	20.
8	10	1520.		<	50.	38.50		60.
9	11			<	50.	40.80		960.
10	12				320.	3.35	1.00	
11	12bis				450.	5.95	4.55	
12	13				200.	22.80	0.40	
13	14				1530.	12.90	1.05	
14	15				1040.	14.70	4.75	
15	16			1.45		12.45	0.75	
16	17				1280.	13.35	1.75	
17	18				1020.	29.50	0.30	
18	19	1090.		<	50.	44.10		45.
19	20	600.		<	50.	42.40		45.
20	152				1830.	2.05	0.40	

		Argent	Arsenic	Or 20ppb	Baryum	Cuivre	Cuivre	Plomb
		g/t	%	mg/t	%	%	g/t	%
Identification	LDI	5.	0.05	20.	0.05	0.01	20.	0.05
	LDS	10000	100	5000	100	100	5000	100
Labo	Client							
21	300	340.	< 0.05		40.90		1010.	10.00
22	719	230.	< 0.05		7.90		380.	6.85

LDI : Limite Inférieure de dosabilité

LDS : Limite Supérieure de dosabilité

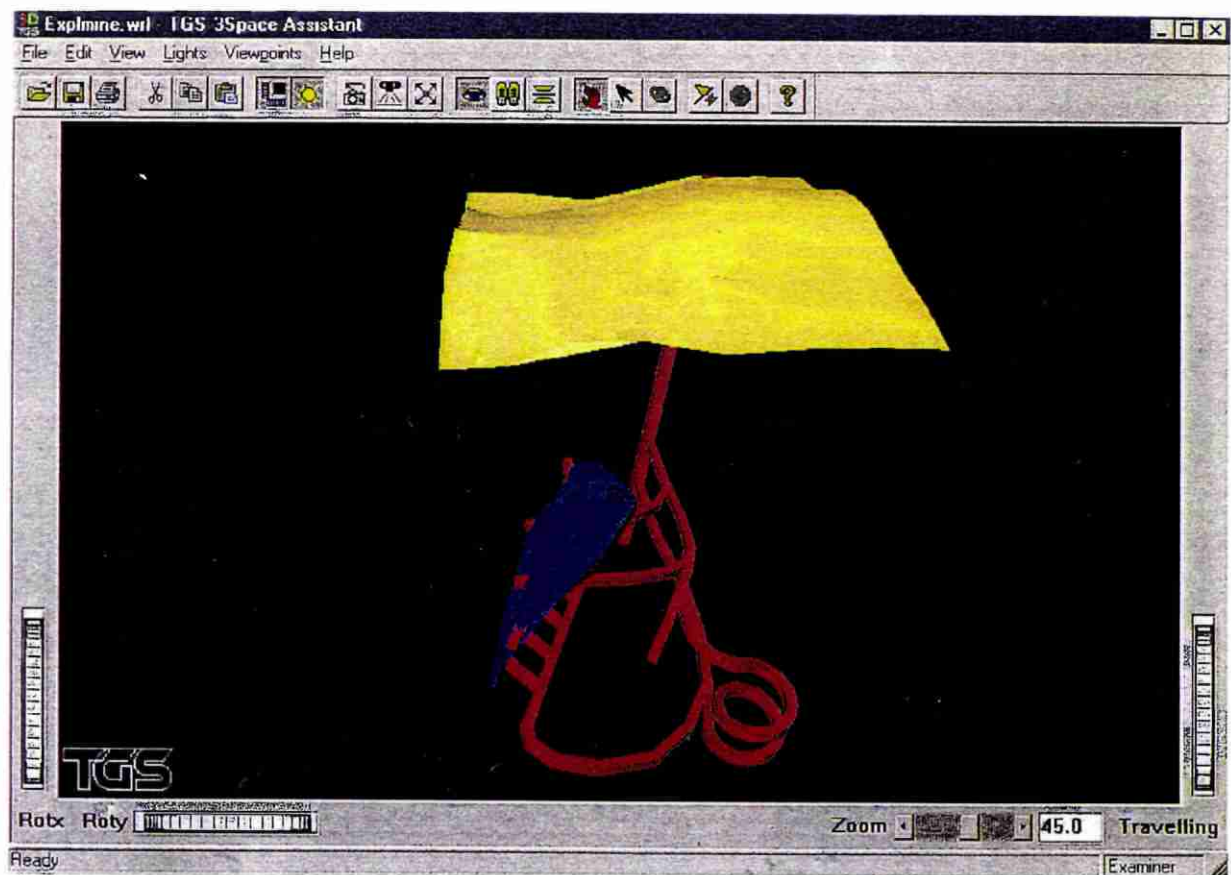
		Plomb	Antimoine	Antimoine	Silicium	Zinc	Zinc
		g/t	%	g/t	%	%	g/t
Identification	LDI	20.	0.01	50.	0.01	0.01	20.
	LDS	5000	100	5000	100	100	5000
Labo	Client						
21	300			580.	6.65	1.00	
22	719			380.	35.20	0.25	

LDI : Limite Inférieure de dosabilité

LDS : Limite Supérieure de dosabilité

ANNEXE 2

Visualiseur VRML : exemple de visualisation 3D d'une mine souterraine



Exemple de visualisation d'un modèle VRML de mine souterraine

- en jaune la surface
- en rouge : réseau des galeries
- en bleu : l'amas minéralisé

Le visualiseur utilisé est 3SpaceAssistant de TGS : coût d'une licence en 1998 : 950 F HT

BRGM
Service Reprographie
Impression et façonnage

BRGM

SERVICE GÉOLOGIQUE RÉGIONAL PROVENCE-ALPES-CÔTE D'AZUR
117, avenue de Luminy - BP 168 - 13276 Marseille cedex 09 - France - Tél. : 04.91.17.74.77