



Direction régionale
des affaires culturelles

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



Secrétariat
d'Etat à l'Industrie

DOCUMENT PUBLIC

*Etude bibliographique des mines de zinc et plomb de
Sentein et Bulard (Ariège)
en appui aux études archéologiques
des concessions minières orphelines :
reconnaissance, potentiel minier et géologie*

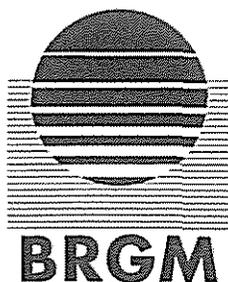
Étude réalisée dans le cadre des actions de Service public du BRGM 00-DEP-409

Rédigé sous la responsabilité de

A. Carquet et J. Féraud

Mai 2001

BRGM/RP-50917-FR



Mots clés : Mines, Zinc, Plomb, Argent, Germanium, Nickel, Cobalt, Sulfoantimoniures, Magnétite, Cassitérite, Etain, Or, Ariège (Mine Bentaillou, Dôme Bosost, Mine Bulard), Pyrénées, Histoire, Géologie, Exploration minière, Ordovicien, Silurien (Gothlandien), Dévonien, Gîte-hydrothermal, Gîte-volcanogène, Contrôle tectonique, Syngénèse, Exhalatif, Volcanosédimentaire, Récif, Gîte stratiforme, Calcaire, Quartzite, Haut-fond, Altération sous-marine, Run, Indice minéral, Métallogénie, Gîtologie.

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

Carquet A., Féraud J. (2001) – Etude bibliographique des mines de zinc et plomb de Sentein et Bulard (Ariège) en appui aux études archéologiques des concessions minières orphelines : reconnaissance, potentiel minier et géologie. Rap. BRGM/RP-50917-FR, 119 p., 3 ann.

© BRGM, 2001, ce document ne peut être reproduit en totalité ou partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

L'ancienne mine de zinc et plomb de Sentein (Le Bentaillou) et sa voisine celle de Bulard (Ariège) sont abandonnées et font actuellement l'objet d'études d'archéologie minière et d'un projet de valorisation. Le BRGM avait participé à leur riche histoire dans les années 50, à la demande des pouvoirs publics soucieux de relancer l'activité extractive, mais ces travaux n'avaient pas abouti à la découverte de concentrations à nouveau exploitables. En revanche, la minéralisation a fait alors l'objet d'études scientifiques très pointues qui ont mis en lumière son cadre géologique assez exceptionnel.

Ce document a été établi à la demande de la Direction Régionale des Affaires Culturelles de la région Midi-Pyrénées, dans le cadre du programme de Service public du BRGM (opération nationale 2000-DEP-409) et de la convention de partenariat signée avec la Sous-Direction de l'Archéologie du Ministère de la Culture et de la Communication.

Il cite et détaille l'ensemble des archives et documents scientifiques publics ou confidentiels conservés ou retrouvés par le BRGM (études du BRGM lui-même ou d'autres opérateurs miniers, universitaires ; publications etc.). Leurs références précises sont indiquées ainsi que les lieux de conservation identifiés. Pour les plus importantes on a ajouté un résumé analytique. A partir de ces études, une synthèse illustrée et on l'espère pédagogique a été rédigée en veillant à ce qu'elle soit accessible aux lecteurs de formation non spécialisée en géologie. A cet effet, un lexique a été ajouté en annexe, qui donne une explication des termes et notions spécifiques incontournables.

Cette synthèse bibliographique étoffée explique la géologie, la minéralogie des mines et l'histoire de leur reconnaissance minière. Un soin spécial a été apporté à relater les connaissances techniques et scientifiques sur Sentein en soulignant (dans une perspective d'Histoire des Sciences de la Terre) leur progression chronologique, les moments fertiles en découvertes et les reculs (et leurs causes), les interrogations intérieures (ou extériorisées) des acteurs et des spectateurs de cette aventure minière, le rôle important joué par de grandes figures (certaines bien connues d'autres moins) du monde des savants et de celui plus anonyme des ingénieurs de l'exploration minière.

Seconde mine de zinc et plomb des Pyrénées pour son tonnage exploité+réserves+ressources (de l'ordre de 200 kt métal) derrière la mine de Pierrefitte, Sentein recèle encore quelques réserves mais surtout des ressources en minerai de faible teneur et un potentiel important de découvertes de gisements similaires cachés aux environs de l'ancienne mine. Mais la conjoncture de ces vingt dernières années ne milite pas pour la reprise proche de travaux d'exploration minière amont qui seraient coûteux et dont le résultat est hypothétique.

Au plan scientifique en revanche, Sentein est aujourd'hui reconnu comme un gisement d'exception dans les milieux de la métallogénie ouest-européenne. Le district est en effet à l'origine du modèle « Bentaillou » : un type exemplaire de minéralisations d'origine volcano-sédimentaire, comparable à celles qui se développent actuellement dans les rides médio-océaniques et dans la Mer Rouge, et qui contribue de façon considérable à la production mondiale des métaux de base, par exemple avec les mines énormes d'Australie, du Canada, de l'Alaska et du Rajasthan.

Au plan minéralogique les souterrains abandonnés de Sentein et Bulard n'ont livré jusqu'à présent aucune espèce minérale précieuse ni cristallisation spectaculaire qui désignent leurs piliers amincis et fragiles à la convoitise des collectionneurs. En revanche on y a trouvé une association de minéraux microscopiques particulièrement originale (à nickel, cobalt, étain, etc.) et notamment un composé de germanium (la brugierite) qui contribuent de leur côté aussi au renom international du district auprès des spécialistes des sciences de la Terre.

Le présent document destiné au public le plus large aura atteint son but si ces ressources géologiques jusqu'ici trop peu connues contribuent à l'intérêt du visiteur, et à l'information des Aménageurs et des Pouvoirs Publics qui sont soucieux à la fois de les faire inventorier, connaître, apprécier, étudier, fructifier, développer et protéger.

Sommaire

SYNTHÈSE.....	3
LISTE DES ANNEXES.....	7
INTRODUCTION	9
1. LE CADRE GÉOGRAPHIQUE ET HUMAIN	11
1.1. GÉOGRAPHIE ET ACCÈS	11
1.2. EVOLUTION DE L'ÉCONOMIE RÉGIONALE	11
1.3. RESSOURCES HUMAINES ET PERSPECTIVES	12
2. GÉOLOGIE RÉGIONALE	15
2.1. STRATIGRAPHIE ET LITHOLOGIE	15
2.2. LES NIVEAUX MINÉRALISÉS.....	16
2.2.1. <i>Le calcaire de Bentailou.....</i>	<i>17</i>
2.2.2. <i>Les quartzophyllades supérieurs</i>	<i>18</i>
2.3. STRUCTURE.....	18
2.4. MINÉRALISATIONS.....	19
3. LA MINE DE SENTEIN : BENTAILLOU – ROUGE.....	21
3.1. HISTORIQUE MINIER DE LA RÉGION	21
3.2. HISTOIRE DE LA CONCESSION DE SENTEIN	22
3.3. CONCESSIONS MINIÈRES INSTITUÉES DANS LE BIROS.....	23
3.4. LES VICISSITUDES DE LA MINE DU BENTAILLOU.....	24
3.5. L'HISTOIRE SE POURSUIT APRÈS LA FERMETURE.....	26
3.6. ACCÈS ET ÉQUIPEMENT	29
3.7. LES INSTALLATIONS DU BENTAILLOU	30
3.7.1. <i>Les travaux anciens</i>	<i>30</i>

3.7.2. Les travaux récents	30
3.8. LE RÉSEAU DES GALERIES DE BENTAILLOU-ROUGE	31
3.9. MÉTHODE D'EXPLOITATION	32
3.10. PRODUCTION DU BENTAILLOU	34
3.11. LES RÉSERVES DE L'ENSEMBLE BENTAILLOU-ROUGE	35
3.12. GÉOLOGIE DE LA MINE DU BENTAILLOU	40
3.12.1. Les références bibliographiques concernant la géologie et la gîtologie du Bentaillou	40
3.12.2. Les connaissances anciennes, du début jusqu'à l'arrêt de l'exploitation (1853-1958)	41
3.12.3. Les nouvelles connaissances, liées aux publications modernes, depuis l'arrêt de l'activité	43
3.13. L'ASSOCIATION MINÉRALE CARACTÉRISTIQUE	44
3.14. INTERPRÉTATION DU GISEMENT DE BENTAILLOU-ROUGE	47
3.14.1. Géologie du gisement au sein de l'ensemble régional	47
3.14.2. Gîtologie : mise en place de la minéralisation	48
4. LES AUTRES EXPLOITATIONS MINIÈRES DE LA RÉGION DE SENTEIN	53
4.1. INDICES ET EXPLOITATIONS DE LA RÉGION	53
4.2. LA MINE DE BULARD	55
4.2.1. Localisation et accès	55
4.2.2. Historique de l'exploitation et production	56
4.2.3. Géologie et minéralisation	57
4.2.4. Interprétation du gisement de Bulard	58
5. CONCLUSIONS ET OPPORTUNITÉS D'ÉTUDES COMPLÉMENTAIRES	61
BIBLIOGRAPHIE	63
DOCUMENTS ÉDITÉS OU POUR LE MOINS PUBLICS	63
<i>Accessibilité et localisation</i>	63
<i>Liste par ordre alphabétique d'auteur</i>	63
RAPPORTS ET ARCHIVES MINIERES NON PUBLIEES	66
<i>Accessibilité et localisation</i>	66
<i>Documents listés suivant leur ordre chronologique de parution</i>	67
DOCUMENTS CONSERVÉS AU SERVICE CENTRAL DES ARCHIVES DU BRGM À ORLÉANS	69
RAPPORTS INTERNES INTERMÉDIAIRES ET NOTES AYANT PEU D'INCIDENCE SUR L'OBJECTIF DE LA PRÉSENTE ÉTUDE, OU DONT LES RÉSULTATS ONT ÉTÉ REPRIS DANS D'AUTRES RAPPORTS CITÉS PRÉCÉDEMMENT	69

Liste des annexes

ANNEXE 1 - ANALYSE DE DOCUMENTS RÉFÉRENCÉS	71
<i>Ané J. (1975) - Les roches, les minerais, les sources minérales et leur exploitation. 55 p.</i>	<i>71</i>
<i>Balcon J. (1953) - Notes géologiques sur la mine de Sentein. Rapport Compagnie Royale Asturienne des Mines. 21 p. + 3 p. d'annexes.</i>	<i>72</i>
<i>Burguière Ph, Roques G. (1996) - Deux siècles d'histoire de la vallée du Biros. 244 p.</i>	<i>73</i>
<i>Destombes J.-P., Lougnon J., Prouhet J.-P. (1955) - Etude géologique de la mine de Bentaillou-Rouge à Sentein (Ariège) et projets de recherches. Rapport B.R.G.G.M., 89 p.</i>	<i>75</i>
<i>Fert D. (1976) - Un aspect de la métallogénie du zinc et du plomb dans l'Ordovicien des Pyrénées centrales : Le district de Sentein (Ariège, Haute Garonne). Thèse 3^e cycle. 140 p.</i>	<i>76</i>
<i>Laforêt Cl., Monchoux P., Oudin E., Tollon F. (1983) - Inventaire minéralogique de la France : département de l'Ariège. Ed. BRGM, 192 p.</i>	<i>78</i>
<i>Lebedeff V. (non daté, cité comme datant de 1943) - Concession de Sentein et ses environs. Mines de Bentaillou, de Bulard, d'Uls, etc.. 36 p.</i>	<i>80</i>
<i>Lougnon J (juillet 1954) - Note sur le gisement de zinc et de plomb de la concession de Sentein et Saint-Lary (Ariège). Rapport B.R.G.G.M., 38 p.</i>	<i>81</i>
<i>Pouit G. (1985) - Les minéralisations Zn (Pb) Ba du Paléozoïque des Pyrénées centrales : une mise au point et un compte rendu des missions 1984. Rapport BRGM n° 85 DAM 037 GMX. 40 p.</i>	<i>82</i>
<i>Pouit G. (1986) - Les minéralisations Zn-Pb exhalatives sédimentaires de Bentaillou et de l'anticlinorium paléozoïque de Bosost (Pyrénées ariégeoises, France). Chron. rech. min., n° 485, pp. 3-16.</i>	<i>83</i>
<i>Prouhet J.-P. (novembre 1958) - Note sur les recherches à Sentein. Rapport B.R.G.G.M. 6 p.</i>	<i>85</i>
<i>Vernhet Y. (1981) - Les minéralisations zincifères de l'Ordovicien et du Dévonien du Val d'Orle (district de Sentein, Ariège), et de la région de Fourcay (Val d'Aran, Espagne). Thèse de 3^e cycle. 226 p.</i>	<i>85</i>
<i>Visvanath S.N. (1957) - Etude géologique de la région minière de Sentein (Pyrénées ariégeoises). Thèse de Doctorat d'Université Nancy, mai 1955 ; publ. Annales de l'Ecole Nat. Sup. Géol. Appl. et de prosp. min. de l'Univ. de Nancy et du Centre de Rech. Pétro. et Géochim. (C.N.R.S.) 106 p.</i>	<i>87</i>
ANNEXE 2 - LEXIQUE	89
ANNEXE 3 - POUR EN SAVOIR PLUS SUR LE MODÈLE BENTAILLOU ET SA GÉOLOGIE. ILLUSTRATIONS.....	94

Introduction

La concession minière ancienne pour zinc et plomb de Sentein (Le Bentailou) et sa voisine celle de Bulard (Ariège) sont orphelines. Leurs travaux miniers abandonnés font actuellement l'objet d'une procédure inter-administrative concernant leur mise en sécurité par la Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement (DRIRE) de la région Midi-Pyrénées. D'autre part elles motivent une étude d'inventaire et de valorisation de leur patrimoine culturel et scientifique sous l'égide d'un Comité de pilotage auquel participent la Direction Régionale des Affaires Culturelles de la région Midi-Pyrénées et le Service de l'Inventaire du Ministère de la Culture.

Dans les années 50, le BRGM avait participé comme opérateur à l'histoire mouvementée de ces mines, à la demande des pouvoirs publics soucieux de relancer l'activité extractive, mais ces travaux n'avaient pas abouti à la découverte de concentrations à nouveau exploitables. En revanche, la minéralisation a fait alors l'objet d'études scientifiques très pointues qui ont mis en lumière son cadre géologique assez exceptionnel.

Ce document a été établi à la demande de la Direction Régionale des Affaires Culturelles de la région Midi-Pyrénées, dans le cadre du programme national de Service public du BRGM qui a été mis en place en liaison avec le S3M/DIMAH du Secrétariat d'Etat à l'Industrie pour prendre en compte autant que possible les besoins d'études scientifiques apparaissant en marge des projets de mise en sécurité de concessions minières orphelines. Le travail (opération nationale 2000-DEP-409) a été financé à parts égales par la dotation du BRGM et par le Ministère de la Culture et de la Communication, suivant la convention de partenariat signée le 31.12.1999 avec la Sous-Direction de l'Archéologie. Il fait un point bibliographique sur la géologie des mines et l'histoire de leur reconnaissance minière.

On a exploité d'abord l'ensemble des archives et documents scientifiques publics ou confidentiels conservés ou retrouvés par le BRGM, de façon à faire un inventaire aussi complet que possible des études géologiques et minéralogiques concernant les deux concessions de Sentein et Bulard (études du BRGM lui-même ou d'autres opérateurs, miniers, universitaires ; publications etc.). Leurs références précises sont indiquées ainsi que les lieux de conservation identifiés. Pour les plus importantes on a ajouté un résumé analytique.

A partir de ces études, une synthèse illustrée et pédagogique a été rédigée, en veillant à ce qu'elle soit accessible aux lecteurs de formation non spécialisée en géologie. A cet effet, un lexique a été ajouté qui donne une explication des termes et notions spécifiques incontournables.

1. Le cadre géographique et humain

1.1. GEOGRAPHIE ET ACCES

La région de Sentein se situe vers le milieu de la chaîne pyrénéenne, dans le Sud du département de l'Ariège, tout contre la frontière espagnole, à environ 25 km au Sud Ouest de Saint-Girons. A partir de cette sous-préfecture, la route départementale 618, puis la départementale 4 permettent d'atteindre facilement les villages de Bonac puis de Sentein.

On se trouve alors dans un ensemble de vallées appelée le Biros, qui constitue une unité géographique et humaine. Seule la vallée de la Plagne est orientée Est-Ouest, mais les autres vallées supérieures encaissées qui s'y rattachent sont Nord-Sud, comme la vallée supérieure du Lez, et viennent buter sur la chaîne frontalière entre 2500 et 2880 mètres d'altitude.

Il y a peu de routes au delà de Sentein, et cela a toujours été un obstacle au développement économique de la région, y compris pour l'activité minière qui a animé cette région du Biros pendant plus d'un siècle, avec un succès inégal, des périodes de marasme et de fermetures suivant des périodes de relative prospérité (Ph. Burguière & G. Roques 1996).

Depuis 1850 et grâce à l'exploitation minière, le village de Sentein est desservi par une route carrossable, qui se termine quelques kilomètres plus loin, au lieu-dit le Bocard, à 925 mètres d'altitude. Ce nom est en fait tiré de l'appellation des anciens broyeurs à minerai (R. Pulou, 1981). C'est là qu'étaient installés les bureaux et ateliers des anciennes exploitations.

La région est globalement très arrosée, avec des brouillards fréquents et des chutes de neige abondantes d'octobre à avril : même l'accès jusqu'au Bocard peut poser des problèmes pendant la longue saison hivernale (R. Pulou 1981).

Le Biros est un pays rude à plusieurs égards, en dehors du fait qu'il est à l'écart des régions de passage. Les villages se sont installés plutôt face au midi, sur le versant appelé "Soulane". La couverture neigeuse persiste souvent jusqu'au mois de juin dès que l'on s'écarte du fond des vallées.

1.2. EVOLUTION DE L'ECONOMIE REGIONALE

L'ouvrage de Philippe Burguière et Gérard Roques, 1996, dans son historique des deux derniers siècles du Biros, mentionne souvent le terme de "Couserans", sans pouvoir en

donner une définition très nette. Ils font état d'un statut de vicomté, qui ne trouve une unité (encore contestée) que lors de l'assemblée électorale tenue à St. Girons en mai 1789, les représentants du Biros faisant partie du Tiers-Etat "couserannais".

L'économie du Biros, comme celle de l'ensemble de la région du Couserans, connaît de graves problèmes, en particulier depuis la fermeture des mines de Bentaillou. L'ouvrage ci-dessus donne une analyse objective et documentée du marasme économique dans lequel se trouve placée la région. Le constat des auteurs est assez triste et pessimiste, mais se termine malgré tout par un appel à l'espoir.

La région de Sentein a été connue pour ses mines de plomb et zinc. La géographie et le climat condamnaient ce pays assez reculé à garder une économie essentiellement agraire. Au milieu du 19^e siècle, la mise en exploitation du gisement de Bentaillou a été une opportunité pour un développement industriel. Après la fermeture de 1957, les habitants de la région auront mis plusieurs décennies pour accepter l'abandon définitif de cette ressource qu'ils ne pensaient pas être tarie.

Les mines sont restées en activité pendant plus d'un siècle, et ont bien animé l'activité économique malgré quelques épisodes d'arrêt. Leur fermeture définitive, après des tentatives infructueuses pour découvrir de nouvelles ressources de minerai, a fait replonger le Biros dans une léthargie qui semble pire que si l'exploitation minière n'avait jamais eu lieu. Pour les habitants qui ont longtemps cru à la réouverture des mines, il est en effet toujours plus démoralisant de voir en permanence des équipements inutilisés, des infrastructures vouées à l'abandon, qu'une absence d'équipements!

1.3. RESSOURCES HUMAINES ET PERSPECTIVES

Aujourd'hui, ce qui reste de l'industrie locale ne génère plus d'emplois qui pourraient contribuer à fixer la population. Les activités autres que pastorales ne sont pas nombreuses.

La construction de gros équipements hydroélectriques avait mobilisé beaucoup de monde, mais la gestion de plus en plus draconienne de leur fonctionnement n'occupe plus qu'une bonne dizaine d'ouvriers et cadres E.D.F.

Peu d'entreprises industrielles avaient survécu à la fermeture définitive des mines en 1957. La modeste scierie de Bonac a fermé quelques années plus tard ; celle de Sentein avait survécu. La petite carrière de marbre d'Uchentein-Balacet a connu des problèmes de ressources et dans le livre cité plus haut, datant de 1996, il n'est pas dit clairement si son activité a pu se poursuivre.

Le dépeuplement de la région est le corollaire des difficultés économiques. Le Biros est une « vallée surpeuplée vers 1780, menacée par le vide à la fin du XX^e siècle » (Ph. Burguière & G. Roques 1996). La population avait considérablement augmenté au cours de la première moitié du 19^e siècle, allant même jusqu'à poser des problèmes d'espace

vital pour les hommes et leurs troupeaux. Le surpeuplement relatif, à l'égard du potentiel agraire, avait été résorbé par l'activité minière, ou au moins ne s'était pas fait sentir, mais à l'inverse le dépeuplement qui a suivi la fermeture des mines aura été catastrophique.

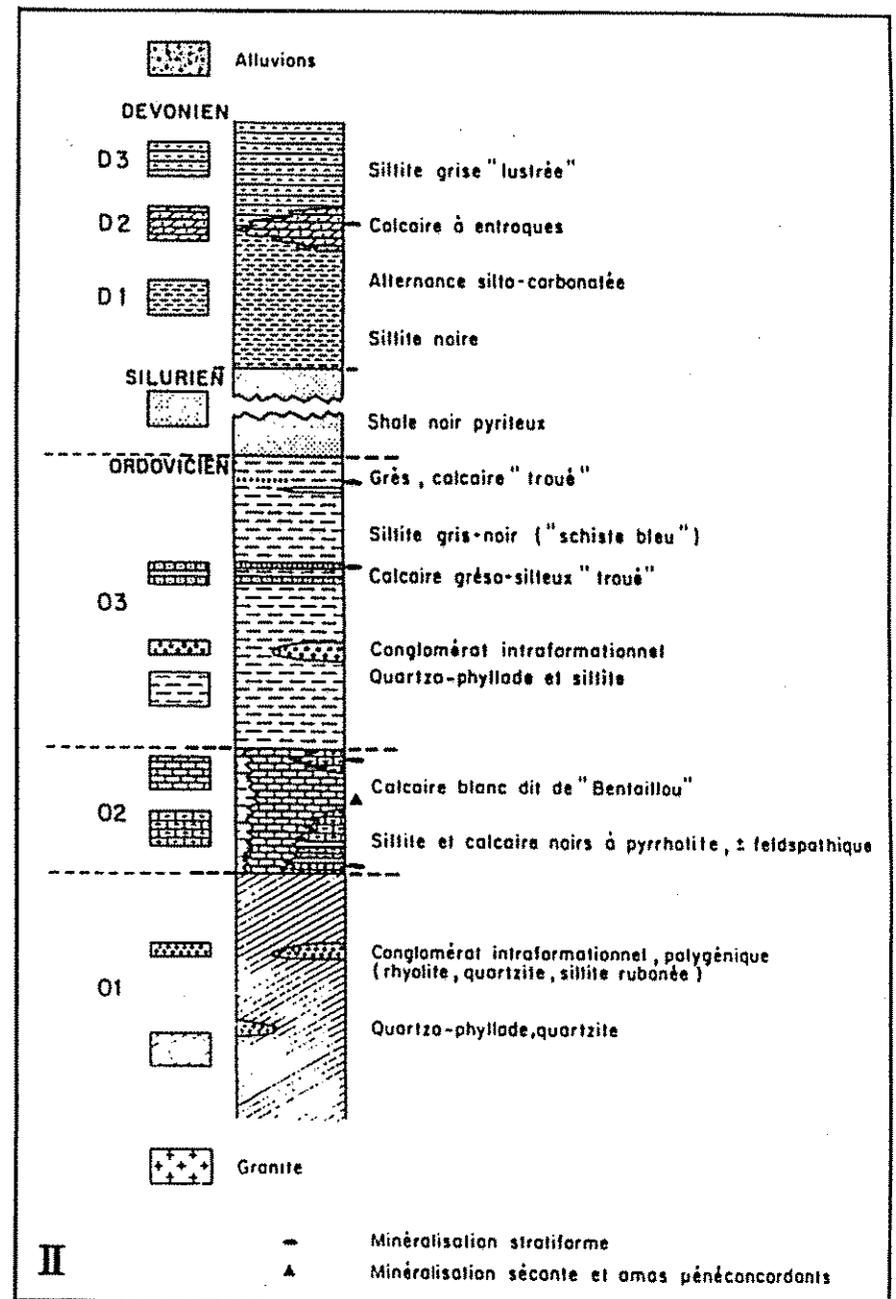
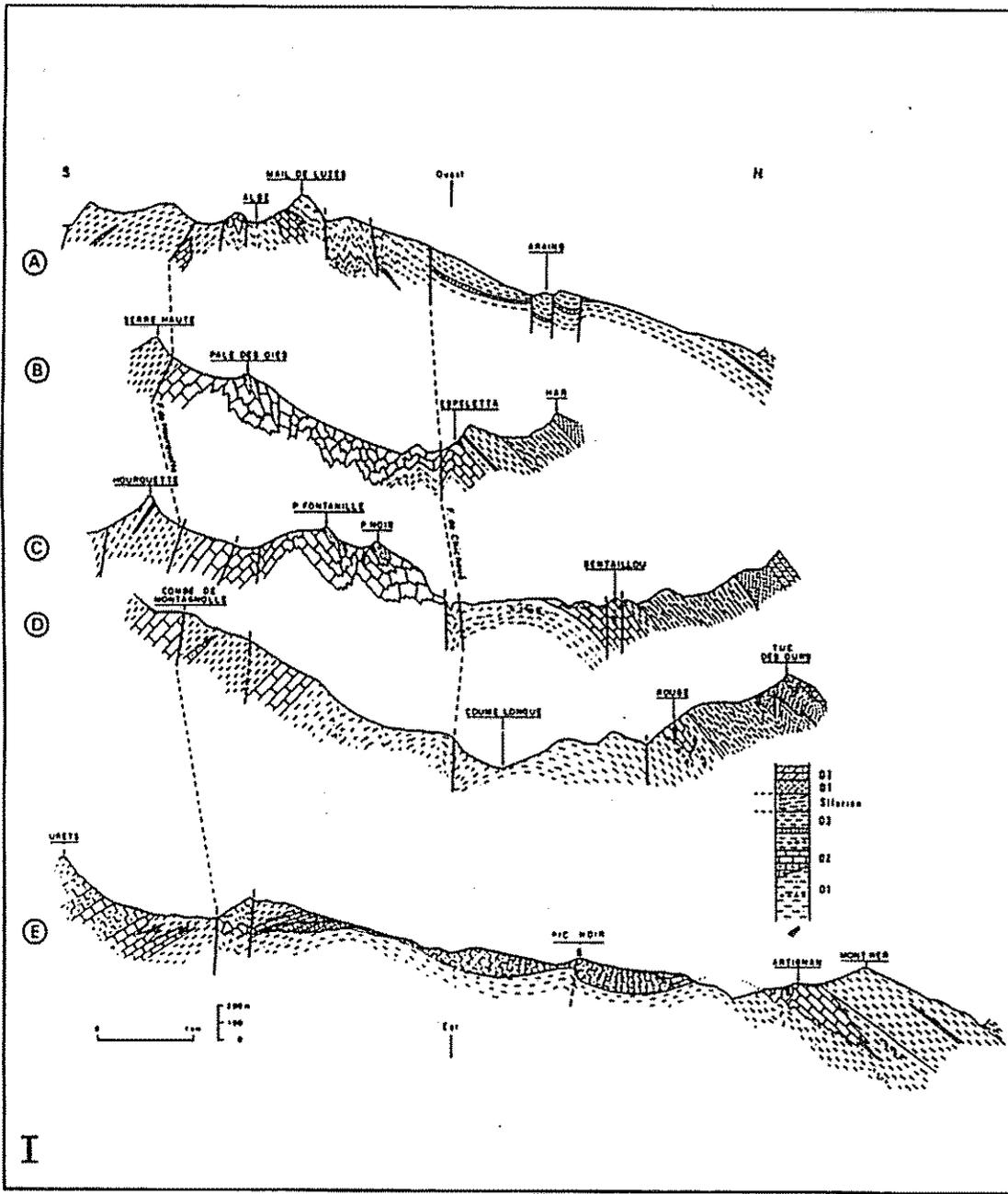
Si la première guerre mondiale avait sérieusement ébranlé les fondations humaines, le dépeuplement s'est considérablement accéléré depuis la fin des années 60, comme le montrent les chiffres donnés par ces auteurs :

	1954	1962	1968	1975	1982	1990
population de la vallée :	1103	771	636	494	368	306
population de Sentein :	642	451	<400			

Quelques réalisations sont venues améliorer la vie locale depuis le début des années 70 : nouvelles routes, adductions d'eau et tout-à-l'égout, fusion de certaines communes devenues trop petites, rénovations diverses, et quelques initiatives privées ont encouragé des jeunes à venir s'installer pour relancer un peu élevage et cultures sous de nouvelles formes.

Le seul réel espoir de la région réside dans le tourisme, sous des formes variées. Depuis 1965, le syndicat d'initiative a pris un second départ, en faisant un gros effort promotionnel. Les thermes du Pradeau qui avaient été fermés au début des années 60, ont été vendus à la Caisse Régionale d'Assurance Maladie de la région parisienne pour devenir une colonie de vacances. On s'oriente maintenant vers les nouvelles formes de tourisme vert, les randonnées, les gîtes ruraux de toutes sortes.

Ainsi même si les derniers champs de céréales disparaissent les uns après les autres, même si les activités agraires ont changé, la région peut tirer parti de son environnement exceptionnel. Ce caractère semble avoir été bien pris en compte dans les derniers schémas économiques.



Coupes interprétatives (I) séries de la zone orientale du dôme de Bosost entre le lac d'Araing et le Maïl de Bulard et (II) lithostratigraphie du Paléozoïque du dôme de Bosost.

2. Géologie régionale

(les mots suivis d'un numéro entre parenthèses (N) renvoient au lexique situé en fin du présent rapport en annexe 2).

Les figures illustratives (cartes, plans et coupes) sont toutes reportées dans l'annexe 3 page 94 et suivantes.

2.1. STRATIGRAPHIE ET LITHOLOGIE

L'ensemble du secteur est compris dans la "zone primaire axiale" des Pyrénées centrales. Sous ce terme, on désigne un ensemble de terrains anciens qui forment l'ossature de la chaîne, allongée W.NW-E.SE, et plus précisément W-E dans la région qui nous intéresse. Ces terrains appartiennent au Paléozoïque et constituent une série allant de l'Ordovicien au Dévonien (1). Au Nord et au Sud (Espagne) de ces formations apparaissent des séries plus récentes du Secondaire et du Tertiaire. (D. Charruau 1974 ; Y. Vernhet 1981). Cette zone axiale est affectée de plis sub-parallèles et est limitée au Nord par la grande faille nord pyrénéenne, le tout étant aligné dans la direction générale de la chaîne.

Les mines de Sentein et Bulard sont comprises dans l'unité géologique à cheval sur la frontière espagnole appelée "dôme de Bosost" (localité espagnole) et "dôme du Bentaillou" pour la partie française, nom du lieu-dit du versant sud des montagnes entre l'étang d'Araing et la haute vallée du Lez.

C'est une grande structure assez simple d'anticlinorium allongé (2) dont le cœur est constitué d'Ordovicien, bordé sur ses deux flancs de Silurien et de Dévonien.

G. Pouit (1985, 1986) donne une description récente et synthétique de la géologie du dôme de Bentaillou, les coupes étant visibles dans les vallées qui ont entaillées l'anticlinorium jusque dans son cœur. L'Ordovicien se compose de trois unités, de bas en haut :

Unité inférieure I (épaisse de plusieurs centaines de mètres) : quartzites (3) et quartzophyllades (4), avec des intercalations lenticulaires de conglomérats (5) à galets de l'encaissant et de roches éruptives.

Unité moyenne II (épaisseur en moyenne de 100 mètres, mais très variable) : calcaire (6) blanc de Bentaillou (IIa), dont la description est détaillée ci-après, associé parfois à des calcaires et siltites (7) feldspathiques (8) noires riches en pyrite (9) et pyrrhotine (10), appelé « pseudo carburé Iib ».

Il convient de signaler dès à présent que ce calcaire n'est présent et bien individualisé que dans la zone de Bentaillou (G. Pouit, 1974). Pratiquement partout ailleurs, il est remplacé par une série monotone de schistes et quartzites rubannés.

Unité supérieure III (au maximum 400 mètres, mais souvent moins) : quartzites semblables à l'Unité I, avec davantage de siltites, qui comprend le niveau des quartzo-phyllades supérieurs de D. Fert (1976) au dessus du calcaire de Bentaillou. Au sommet, en transition avec les shales noirs (11) siluriens, on trouve des intercalations, d'une part de grès et conglomérats, et d'autre part de "calcaire troué" (ou "calcaire de Crabère") renfermant des fossiles de l'Ordovicien supérieur.

Cette dernière Unité III de l'Ordovicien supérieur, et surtout l'Unité moyenne II du dessous comprennent les formations porteuses de la minéralisation (12) en zinc et plomb et, à ce titre, elles feront l'objet d'une description plus détaillée dans le paragraphe ci-après.

Au dessus, le Silurien est composé de schistes noirs faciles à identifier. Ils forment un niveau repère pour le secteur et même pour l'ensemble de la coupure "Pic de Maubermé" de la carte géologique de la France au 1/50 000 (J. Boissonnas 1972). On a donc considéré comme Ordovicien tout ce qui se trouvait sous ces schistes pyriteux, d'autant plus facilement que la présence de Cambrien est très improbable, il n'en a jamais été observé dans le secteur.

Cette succession lithostratigraphique (13) ne souffre d'aucune ambiguïté : en effet, elle peut être observée directement sur plusieurs coupes de terrain, elle est bien datée par les fossiles qu'elle renferme surtout à partir de l'unité III, et elle est coiffée par le Silurien toujours bien reconnaissable.

Le Dévonien qui vient ensuite comprend lui aussi trois unités : siltites noires, siltites et calcaires gris à noir, puis ensuite des calcaires blancs à débris d'échinodermes, et enfin des siltites grises à noires avec quelques intercalations calcaires.

Dans le détail, la géologie du dôme de Bentaillou paraît beaucoup plus complexe quand on étudie chacun des secteurs minéralisés, et elle devient alors sujette à des interprétations subjectives, en particulier en fonction des observations structurales locales (D. Fert 1976).

2.2. LES NIVEAUX MINERALISES

Les mines de Sentein – ou du Bentaillou – sont des exploitations de zinc et de plomb qui sont contenus dans des niveaux bien définis de l'Ordovicien supérieur, au contact supérieur du "calcaire de Bentaillou" et au sein des "quartzophyllades supérieurs" qui viennent juste au dessus et qui constituent l'Ordovicien terminal.

2.2.1. Le calcaire de Bentaillou

C'est le niveau le plus remarquable de l'Unité moyenne II de l'Ordovicien, et aussi le plus important puisque le minerai se trouve à sa partie supérieure. Il comporte des niveaux blancs bien visibles dans le panorama qui en font un niveau repère malgré sa puissance (14) variable. Il est présent principalement autour du cirque de la Plagne, c'est à dire dans le bout de la vallée sur le versant nord de laquelle se trouve le lieu-dit le Bentaillou. On peut retrouver cette formation plus loin vers l'Ouest, avec une épaisseur bien moindre et avec un agencement différent de ses niveaux, et aussi très loin en Espagne, à la mine de Liat, dans la région du Val d'Aran (P. Guérin 1979).

Sans entrer dans le détail de l'étude de Y. Vernhet (1981), il est possible de distinguer :

- * à la base, des grès carbonatés sombres, passant rapidement à un calcaire noir, cet ensemble mesurant moins de 8 m de puissance.
- * au dessus, le cipolin (15) est le terme le plus remarquable de l'Ordovicien. C'est une formation généralement bien blanche, mais les conditions de son dépôt (impuretés) peuvent faire varier sa teinte au gris. Son épaisseur peut aller de 1 à 40 mètres, en fonction des conditions de son dépôt, mais également en fonction de la tectonique. Certains spécialistes de la région, comme G. Pouit (1978), évaluent son épaisseur localement à plus de 200 mètres. Cet auteur signale l'association de la base du calcaire de Bentaillou à des siltites riches en sulfures interprétées comme des dépôts volcaniques. La présence de ces niveaux volcaniques, ici ainsi que dans "l'Unité inférieure I", prendra toute son importance lors de l'interprétation qu'il propose pour le gisement.

Ce cipolin n'est pas homogène. Il comporte deux types d'intercalations : d'une part, des lentilles (16) quartzitiques qui peuvent être minéralisées latéralement, mais qui restent rares et peu développées, et d'autre part des amas ankéritiques (17, 18). Ces derniers ont des positions variées dans la série, mais se trouvent souvent dans la partie supérieure du cipolin. Leur importance réside dans le fait qu'ils sont souvent liés à une minéralisation. Leur présence n'implique pas forcément une concentration en plomb-zinc, mais toute concentration métallique de ce type dans la "formation de Bentaillou" est accompagnée de lentilles ankéritiques (Y. Vernhet 1981).

- * Les alternances silico-phyllito-carbonatées constituent le sommet de la formation du "calcaire de Bentaillou". C'est en fait un passage latéral de faciès de la partie supérieure du cipolin. Il s'agit d'une alternance de lits clairs carbonatés identiques au cipolin et de lits sombres à quartz et phyllites (19).

La formation de Bentaillou ainsi définie n'a qu'une extension locale. Son individualité réside uniquement dans la présence de la masse du cipolin qui passe latéralement et à sa partie sommitale à la série silico-phyllito-carbonatée. En extension latérale, la

discontinuité de la formation calcaire, voire sa nature lenticulaire, avaient été notées par J. Durand et E. Raguin (1943), et par J.-P. Destombes, J. Lougnon, J.-P. Prouhet (1955). Ils avaient d'abord interprété le calcaire comme un dépôt de plus grande profondeur, mais cette idée a été complètement revue par la suite. Elle impliquait une paléogéographie (20) totalement différente de l'interprétation qui a cours aujourd'hui.

Pour expliquer l'origine du gisement, définir des guides de prospection et rechercher ainsi de nouvelles réserves économiques, il a été nécessaire d'étudier plus précisément cette formation du Bentaillou. Dans le chapitre relatif à l'interprétation du gisement, il sera précisé que le calcaire du Bentaillou correspond à une paléogéographie particulière : déposé sous une faible tranche d'eau, il correspond probablement un ancien récif.

X. Boubée de Gramont (1963) fait remarquer que tous les gisements liés à cette lentille calcaire sont situés dans sa partie périphérique : Bentaillou-Rouge dans la partie nord, Bulard-Artignan sur le bord oriental, les mines espagnoles, proches de la frontière, dans la partie sud, les indices étant nombreux dans la partie occidentale : Albe, Araing et la Serre d'Araing.

2.2.2. Les quartzophyllades supérieurs

Cet ensemble est bien représenté dans la région, avec une couleur gris sombre à patine devenant brun rouille par oxydation. C'est une répétition monotone d'environ 150 mètres de puissance, de lits phylliteux et quartzophylliteux, mais le niveau un peu particulier dit de "Crabère" permet de distinguer trois unités :

- une série détritique infra Crabère comportant des intercalations d'un conglomérat grossier ;
- le niveau de Crabère proprement dit, qui contient des fossiles et qui présente des faciès caractéristiques, en particulier un calcaire vacuolaire qui peut rappeler le calcaire de Bentaillou ;
- la série détritique supra-Crabère, qui comprend un microconglomérat (21), des passées carbonatées et des shales noirs en plaquettes faisant transition avec le Silurien.

2.3. STRUCTURE

Le cœur de cette zone axiale pyrénéenne est occupé par une succession de massifs granitiques autour desquels s'agencent les terrains sédimentaires paléozoïques. Cette présence de granites peut en fait révéler deux grands types de dispositions aux conséquences très différentes malgré des aspects à première vue similaires sur une carte géologique, pour un observateur non averti :

- les séries sédimentaires viennent reposer sur des massifs de granite préexistants, sans modification mutuelle des deux formations ; l'intervention de l'érosion, avec la surface topographique peut faire réapparaître, en carte, le massif granitique au sein de la couverture sédimentaire ;
- le granite est intrusif : il est venu se mettre en place au sein de la série sédimentaire qu'il recoupe littéralement, en provoquant un métamorphisme de contact (22) ; de plus, et c'est le plus important sur le plan économique, cette mise en place peut être accompagnée et suivie d'une activité hydrothermale (23) génératrice de gisements minéraux ; c'est un phénomène qui a pu jouer un rôle important dans la formation des gisements de la région.

La zone axiale des Pyrénées est recoupée par de nombreux massifs de granite intrusifs. Il faut signaler le granite du Riberot, le plus proche du gisement de Sentein, qui affleure à 10 kilomètres vers le Sud-Est (C. Lévy et J. Prouhet 1960).

Nous avons vu que cette région a une structure simple d'anticlinorium, d'où elle tire son nom de "Dôme de Bosost", ou "Dôme du Bentaillou" pour la partie française. Elle a été soumise à des plissements au cours de l'orogénèse hercynienne (24). Ces plis sont allongés suivant la direction générale de la chaîne pyrénéenne.

Les plissements ont souvent été accompagnés de fracturations, et c'est pourquoi on relève un système de failles, elles aussi alignées dans la même direction N90° à N110°. Ces phénomènes sont intervenus pendant la seconde moitié de l'Ere Primaire, et en particulier pendant le dépôt des formations ordoviciennes et dévoniennes. La tectonique ainsi qualifiée de synsédimentaire a largement influencé la nature et le mode de dépôt des couches qui continuaient à se déposer pendant la même période.

Les shales noirs siluriens correspondent à une période tectonique plus calme (G. Pouit 1985).

Des phases tectoniques sont intervenues postérieurement, en particulier vers la fin de ce cycle hercynien, en faisant évoluer les mêmes structures. Celles-ci vont être encore rajeunies au cours de l'orogénèse alpine qui est elle beaucoup plus récente (étalée sur les Eres Secondaire et Tertiaire, soit il y a 245 à 2 millions d'années).

Enfin, il faut noter pour l'ensemble de la chaîne pyrénéenne, l'intervention d'une phase tectonique tardive qui est responsable d'une famille de failles cassantes, de direction générale voisine de Nord-Sud.

2.4. MINERALISATIONS

Dans son mémoire, A. Dommanget (1999) évoque le passé minier très ancien de la zone centrale de la chaîne pyrénéenne, avant de livrer quelques considérations très simples sur la géologie de la région.

G. Pouit (1974) distingue trois districts à zinc et plomb dans les Pyrénées centrales, d'après des données géologiques et structurales et les caractères géologiques des minéralisations :

- district de Chèze-Pierrefitte-Estaing, plus de 80 km. à l'Ouest ;
- district du Dôme de Bosost, auquel appartiennent les mines de Sentein et dont seul le versant nord est en territoire français ; il est caractérisé par la présence exclusive, sous le Silurien, de 4 à 500 mètres d'Ordovicien supérieur, avec l'omniprésence d'un matériel détritique d'origine volcanique, sans possibilité d'individualiser les appareils volcaniques avec certitude ;
- district de Carboire, 25 km à l'Est.

Sur le plan minier, la région de Sentein est connue des spécialistes sous le nom de "district plombo-zincifère du Bentaillou", nom tiré du lieu-dit où est située la mine principale. Ce nom donne aussi la nature des métaux qui y ont été extraits, en premier lieu du zinc, et aussi du plomb.

Les minerais proviennent des niveaux minéralisés de l'Ordovicien supérieur qui ont été décrits ci-dessus. Il existe dans la région des minéralisations différentes, c'est à dire situées à d'autres niveaux lithostratigraphiques (Ordovicien inférieur ou Dévonien), ou qui concernent d'autres métaux, comme le cuivre à Irazein, mais la présente étude concerne la mine de Sentein proprement dite, appelée "mine du Bentaillou" (son contexte géologique, son histoire, sa production), et également mais à un degré moindre, la mine de Bulard, d'accès aujourd'hui très difficile.

La mine du Bentaillou a été, et de très loin, l'exploitation la plus importante de l'ensemble géologique du dôme de Bosost, côté français (G. Pouit 1986), suivie de celle de Bulard. D'autres métaux que le zinc et le plomb ont pu provenir de ces deux mines, mais il s'agit de sous-produits valorisés au cours du traitement des minerais de zinc et de plomb. En dehors des mines principales du Bentaillou et du Bulard, nous nous bornerons à mentionner les travaux de recherche qui se trouvent dans leur voisinage immédiat.

Les minerais de zinc et de plomb consistent en des sulfures très courants, communs à beaucoup d'autres gisements, et appelés respectivement "blende" (25) et "galène"(26). Dans un tel contexte géologique, ils sont souvent accompagnés d'autres sulfures, qui peuvent aussi devenir très abondants, sans pour autant devenir eux-mêmes du minerai : pyrite (9), pyrrhotite (10), chalcopyrite (27), magnétite (28) et mispickel (29).

3. La mine de Sentein : Bentaillou – Rouge

3.1. HISTORIQUE MINIER DE LA REGION

Beaucoup d'ouvrages mentionnent que l'exploitation minière aurait débuté dès l'antiquité dans le Biros et même dès l'âge du Bronze d'après J. Ané (1975) citant le professeur Lizop agrégé d'Histoire et de Géographie. Plusieurs chercheurs avancent que les Pyrénées étaient une des premières contrées minières de la Gaule (J. Ané 1975). Comme cela est attesté en d'autres sites des Pyrénées, on est tenté d'attribuer aux périodes pré-romaines et romaines des traces d'exploitations anciennes à proximité immédiate de Sentein (Irazein et Port d'Orle), pour le plomb argentifère et le cuivre. Le minerai était traité pratiquement sur place, en utilisant le bois des zones forestières proches (D. Fert, 1976).

Certains autres chercheurs en doutent pourtant : Ph. Burguière et G. Roques (1996) rapportent qu'au début du 19^e siècle, un érudit digne de foi de St. Girons ne connaît dans la région aucune mine datant d'une époque antérieure.

Ces deux auteurs régionaux donnent un historique détaillé, et bien documenté de la mine de Sentein depuis les phases d'exploration préliminaire. Ils s'appuient sur des documents qu'ils ont pu consulter dans les administrations locales, en particulier les Archives départementales de l'Ariège, les comptes rendus des délibérations municipales de Sentein, Bonac, Irazein et autres communes, les archives de l'Office du Tourisme, et même les archives paroissiales (voir l'analyse de l'ouvrage en annexe 1).

L'activité minière dans le Biros a officiellement débuté en 1848, après l'institution de la concession de Sentein. Les débuts de l'exploitation connaissent beaucoup de difficultés liées à plusieurs facteurs, certains d'entre eux dus à la mine elle même, d'autres en rapport avec l'environnement politique et économique de cette seconde moitié du 19^e siècle.

De nouvelles concessions minières sont ensuite accordées, et c'est surtout à partir du début du 20^e siècle que l'exploitation des mines du Biros se développe et donne un réel essor à l'économie locale. Cette activité connaît toujours des vicissitudes liées aux conditions socio-économiques et aux graves crises politiques, mais des problèmes plus graves surgissent au milieu des années cinquante.

Alors que le pays profite de la grosse reprise économique d'après guerre, les cours du zinc et du plomb connaissent une chute dramatique. Les mines ferment définitivement en 1957, et l'économie régionale est gravement sinistrée. L'exode de la population active, assez modéré jusque là, devient très rapide et se poursuit jusque dans les années 70. Les autres entreprises industrielles périssent et ne font qu'accélérer ce mouvement.

Sous la pression de la population, les collectivités locales et même l'Etat vont soutenir des tentatives de réouverture. Des travaux de recherches sont entrepris de 1954 à 1958, puis de 1961 à 1963, mais ils n'aboutissent pas à la reprise escomptée.

3.2. HISTOIRE DE LA CONCESSION DE SENTEIN

Si l'on ne considère que l'époque moderne, c'est-à-dire celle qui nous a laissé, grâce au cadre administratif de la législation minière, des traces écrites se rapportant à des titres miniers, il semble que les premiers documents concernent justement la mine du Bentaillou. Jean-Joseph de Jauzas, habitant de Saint-Girons, demande et obtient en 1824, une autorisation pour effectuer des "fouilles" sur un "filon de plomb à Chichoix-Bentaillou", mais ensuite il n'utilise pas cette autorisation (Ph. Burguière & G. Roques, 1996).

En 1839, Trinchant, un avocat de Limoux, demande et obtient aussi un permis de "fouilles" au même endroit. Il semble qu'il ait agi sur le conseil de deux habitants de la commune, l'ardoisier Jean Garié Verdure et son voisin Marc Ané, qui seraient en fait les véritables "inventeurs" (30) de la mine du Bentaillou.

Malgré tout, le début des travaux de recherche ne semble pas soulever un grand enthousiasme. Les découvertes doivent être modestes car un rapport de 1840 (non consulté) ne mentionne que "quelques parcelles" de minerai de zinc et de plomb. Les recherches continuent dans un contexte assez favorable. C'est en effet l'époque de l'exploration géologique des Pyrénées, sous l'impulsion du suisse De Charpentier.

La plupart des gisements de la région que l'on connaît aujourd'hui sont découverts à l'occasion de ces levés, et ils figurent sur les cartes de l'époque, même de petits indices ou ceux d'accès difficile comme le Bulard.

Ces découvertes répétées doivent inciter des vocations minières de quelques notables biroussans : le notaire et avocat Joseph-Hilaire Aran, le meunier Jean Caze-Subra, le propriétaire Jean Prat Blanc, et le percepteur Etienne Bordes, fondent une société en 1843, sous la direction de Duplan, entrepreneur à Toulouse, pour "continuer les fouilles en carrière" pendant l'hiver 1843-1844.

Les premières rivalités se manifestent alors, ce qui laisse penser que l'on commence à prendre les découvertes en plus grande considération. Trinchant finit par céder ses droits en 1844, à la société Duplan dont le Baron de Boisrouvray prend la tête en 1845. Celui-ci croit en l'établissement d'une grande concession minière. Il parvient à obtenir l'autorisation du conseil municipal de Sentein pour "maintenir en terrain domanial les premières baraques construites pour les travaux aux alentours du Bentaillou", malgré le discrédit que M. de Méritens, un concurrent, tente de jeter sur les travaux de la société Duplan-Boisrouvray.

Les démarches en vue de l'établissement d'une concession minière sont lancées le 4 décembre 1846, par voie d'affiches et consultation de l'opinion publique. Les conseils municipaux de Sentein, Bonac et Antras donnent un avis favorable à l'ouverture de mines qui pourraient venir juguler la grande misère de 1847 qui sévit partout en Europe. Seule la municipalité d'Irazein s'y oppose, craignant que les droits de pacage des montagnes de Chichoué et de la Plagne soient menacés.

M. de Boisrouvray va jusqu'à promettre des encouragements pécuniaires importants aux inventeurs et aux premiers actionnaires, mais les formalités demandent encore plus d'un an, à cause des événements politiques de 1848.

La concession minière est enfin accordée à la société Duplan-Boisrouvray par décret du 25 septembre 1848, signé par le chef du Pouvoir Exécutif provisoire, le Général Cavaignac. Cette concession pour le zinc et le plomb couvre une vaste zone comprenant Saint-Lary et presque tout le Biros.

Nous allons voir que cette concession va changer de superficie et plusieurs fois de titulaire. Elle a été suivie d'autres concessions.

3.3. CONCESSIONS MINIERES INSTITUEES DANS LE BIROS

CONCESSION DE SENTEIN – SAINT-LARY

Instituée le 25 septembre 1848, pour zinc et plomb, sur les communes de Sentein, Saint-Lary, Antras et Augirein ; sa superficie de 6 935 ha sera réduite à 2 347 ha par décret du 13 janvier 1935.

CONCESSION DE BULARD

Instituée le 15 juin 1893, pour zinc et plomb argentifère et les métaux connexes, sur la commune de Bonac ; superficie : 434 ha.

CONCESSION D'ORLE

Instituée le 17 décembre 1907, pour zinc, plomb, argent et métaux connexes, sur la commune de Bonac ; sa superficie de 945 ha sera réduite à 440 ha le 9 août 1913.

CONCESSION D'IRAZEIN

Instituée le 2 décembre 1909, pour cuivre et métaux connexes, sur les communes d'Augirein, Antras, Irazein, Balacet et Salsein ; superficie : 456 ha. Elle est devenue un des sites minéralogiques français les plus prestigieux grâce aux

extraordinaires cristaux de sulfo-antimoniure de cuivre, la tétraédrite, qu'elle a livré en 1906 (D. Gol, 1998).

Les deux concessions de Sentein et de Bulard sont amodiées par la Société Française des Mines de Sentein (S.F.M.S.) à l'Union Minière des Pyrénées (U.M.P.) par contrat du 8 juin 1943, mais ce contrat sera dénoncé en 1958.

3.4. LES VICISSITUDES DE LA MINE DU BENTAILLOU

Les mines du Biros, en particulier celles de Sentein et Bulard ont connu plus d'un siècle de péripéties relatées dans le détail par Ph. Burguière & G. Roques (1996), qui les ont bien replacées dans le contexte social, économique et politique de l'époque.

Après l'institution de la concession en 1848, les travaux commencent assez lentement à cause du peu de moyens de la société Boisrouvray et du manque de confiance politique des investisseurs potentiels. De nouveaux partenaires fondent la "Société anonyme des mines de plomb et de zinc de Sentein et Saint-Lary" en 1853, et c'est à cette date que commence réellement la production.

En dehors de la mine proprement dite, les premiers travaux d'infrastructure concernent la descente des minerais du Bentaillou jusqu'à la vallée et le traitement de ce minerai. On construit un chemin en lacets du Bentaillou à la Plagne, une laverie est achevée au "Bocard" en 1854, et la route vers Saint-Giron est améliorée.

Les premiers conflits sociaux éclatent déjà à cette époque. Un premier arrêt d'activité se produit en 1861, à cause de difficultés économiques générales. La reprise se fait en 1862, sous la direction du Parisien Kaulek. Le minerai est alors descendu par un plan incliné hydraulique qui doit être encore visible jusqu'au fond du cirque de la Plagne. Un petit train est ensuite utilisé pour reprendre le minerai de cet endroit jusqu'à la laverie du Bocard. C'est en 1866 que l'on commence les démarches pour construire un câble transporteur de la Cigalière au fond de la Plagne, et le plan incliné hydraulique sera ensuite abandonné.

Le 15 août 1870, la crise politique qui suit la défaite militaire provoque la fermeture des mines. En 1872 et 1875, les crues endommagent le chemin de Sentein à Eylie et le passage des charrettes de concentré de minerai n'étant plus possible, les mines ne peuvent reprendre leur activité.

En 1878, la société est revendue à des Anglais. Ils forment la "Sentein Mining Company Limited" qui reprend l'exploitation. Le chemin d'Eylie à Sentein est définitivement remis en état en 1881. A cette époque, les recherches se poursuivent à la "Malh de Bulard" (ou "May de Bulard"). Elles aboutissent à une concession minière, et rapidement à une exploitation dont le minerai est lui aussi descendu par téléphérique jusqu'au Bocard où il est traité.

Au début du 20^e siècle, l'activité minière bat son plein. C'est une période de relative prospérité nationale, et c'est aussi le cas pour les mines du Bentaillou. La société est devenue la "Couserans Nescus Ltd" et exploite d'autres mines. Un nouveau câble de transport Bentaillou-Rouge-le Bocard est installé en 1904.

La région est réellement devenue un pays minier. Sainte Barbe, patronne des mineurs, est dignement fêtée, à tel point qu'en 1912, un vitrail la représentant est posé dans l'église de Sentein, où il doit encore exister.

Des difficultés financières aboutissent à la liquidation de la société en 1908, remplacée provisoirement par le "Syndicat Minier de Sentein", qui est à son tour en cessation de paiement. La concession est reprise en 1913 par un exploitant qui fonde la "Société Française des Mines de Sentein" (S.F.M.S.). Celle-ci restera propriétaire de la concession jusqu'à 1990.

La construction d'une ligne de tramway entre Saint-Girons et Sentein est un élément extérieur à la mine, mais cet équipement y a trouvé une grande part de sa justification. Envisagée dès 1905, elle débute en 1911 et le tramway est totalement mis en service en 1913 (l'Ariégeois Magazine, n°141). Il est utilisé pour les voyageurs, mais aussi pour transporter les sacs de minerai de Sentein à Saint-Girons. La liaison sera prolongée jusqu'à l'usine du Bocard après la guerre de 1914-1918.

Cette guerre fait remonter considérablement les cours du zinc et du plomb, et la demande est forte. La production minière est élevée, et ceci à une époque où la main d'œuvre masculine est mobilisée ailleurs. Après la guerre, elle se maintient pour la mine du Bentaillou, alors que beaucoup d'autres mines sont entrées en sommeil.

Un conflit social grave éclate en 1926, provoquant un arrêt de travail de cinq mois. La reprise est de courte durée, la production s'arrête en 1927 à cause de la chute des cours du zinc et du plomb. Les espoirs d'ouverture de nouvelles mines dans le voisinage ne se concrétisent pas.

Beaucoup d'anciens mineurs travaillent alors à des équipements de la région, hydroélectriques et autres, mais ces travaux ne sont pas durables. L'activité périclète et le service du tramway s'arrête en 1937.

La seconde guerre mondiale provoque de nouveaux besoins en zinc et plomb, et les mines reprennent leur activité en 1941. LA S.F.M.S., toujours propriétaire, confie ensuite l'exploitation à "l'Union Minière des Pyrénées" (U.M.P.), par un contrat d'amodiation signé le 8 juin 1943.

Premier signe inquiétant dans la région, la mine du Val-de-Burat ferme en 1945. A Sentein, l'exploitation se poursuit, mais les années 50 sont fatales. Alors que l'économie nationale est en plein essor, les cours du zinc et du plomb redescendent

irréremédiablement, et l'U.M.P. doit fermer les mines du Bentailou et la laverie du Bocard en 1953.

3.5. L'HISTOIRE SE POURSUIT APRES LA FERMETURE

La fermeture ci-dessus consiste surtout en l'arrêt de la production. Les travaux de recherches assez importants qui avaient été entrepris depuis 1948 ont été arrêtés un peu avant la fin de la production par manque de moyens. Les circonstances forcent alors à trouver de nouvelles ressources, et donc à reprendre les recherches.

Le contexte est à la fois déprimé et encourageant. L'ambiance est déprimée parce qu'après la période de l'après-guerre où l'état avait encore besoin de matières premières à n'importe quel prix et devait relancer la machine économique et l'emploi, l'économie de marché reprend ses droits, au moins dans l'industrie des métaux non-ferreux. Dans le Sud-Ouest, la population voit les mines non rentables ou jugées épuisées fermer les unes après les autres : en 1954 Peñarroya ferme sa concession de Labarre et Corbières (La Rabasse) à Ceilhes ; en 1956 elle ferme la concession du Minier d'Orzals à Viala-du-Tarn qu'elle avait « imprudemment » rachetée à la CRAM en 1952 ; en 1961 elle ferme Ramponenche ; en 1969 sa concession de Pierrefitte-Nestalas, le fleuron des Pyrénées ; en 1971 c'est Anduze.

Mais des messages encourageants parviennent car l'état a créé le B.R.G.G.M. pour découvrir et explorer de nouveaux types de gisements, des métrages de sondage sont à cette époque assez faciles à déployer pour sonder les racines des anciennes mines, et les premiers efforts commencent à payer, notamment dans les Pyrénées avec la découverte du tungstène du Pic de Costabonne puis celui de Salau. En 1951, la Peñarroya s'investit activement dans l'exploration du district de Largentière (Ardèche) et y démarrera l'exploitation en 1964 ; en revanche son rachat de La Loubatière en 1956 dans la Montagne Noire s'avère un échec et elle la ferme en 1962 ; même déception pour St-Sébastien-d'Aigrefeuille dans les Cévennes rachetée en 1951 et fermée en 1962, pour Peyrebrune rachetée en 1956 et fermée en 1975 après une longue agonie.

A Sentein, commence alors une période de l'histoire de la mine intéressante peut-être aux plans sociologie et histoire industrielle, car on y relève cycliquement une suite de signaux contradictoires. En analysant les archives, on retrace en effet successivement :

- des moments de pression de la part des pouvoirs publics ou de l'opinion locale pour qu'on tente une redéfinition du projet industriel, pour le rendre économiquement rentable ;
- des moments d'optimisme de la part des opérateurs miniers ;
- des campagnes de nouveaux travaux sur le terrain exécutés avec énergie et professionnalisme par des équipes sans doute très motivées ;

- des passes de découragement quand les premiers nouveaux calculs de réserves apparaissent loin des seuils de faisabilité imposés par les nouveaux coûts d'investissement et opératoires en vigueur et par le marché ;
- et lorsque l'enthousiasme du début semble presque retombé, il n'est pas rare qu'un ultime paragraphe soit ajouté au rapport de l'expert qui, tout bien pesé (...et peut-être parce que l'opinion publique et/ou la hiérarchie politico-administrative n'attendent que ça), suggère néanmoins une nouvelle piste pour le rétablissement de la rentabilité de la mine, et le cycle repart.

Ainsi, plusieurs rapports anonymes de géologues et cadres de l'U.M.P., datés de 1953 à 1955 et connus sous forme de correspondance, font état de réserves établies de l'ordre de 100 000 tonnes de minerai seulement à 4 ou 5 % de zinc et 1 à 1,5 % de plomb. Ces réserves ne peuvent justifier la reprise de l'exploitation tant souhaitée par la population locale et ses représentants, mais tous ces rapports s'accordent à affirmer que l'exploitation n'a pas atteint de limites géologiques. La minéralisation est encore ouverte et mérite des travaux de prospection avec des espoirs légitimes.

L'exploration reprend sérieusement après qu'une convention ait été signée en novembre 1955 entre le B.R.G.G.M., l'U.M.P. et la S.F.M.S. (Archives BRGM, dossier administratif). Un programme de recherches est établi et réalisé, comprenant plusieurs phases, jusqu'à juillet 1957. Les travaux sont destinés à rechercher des extensions vers le Nord et le Nord-ouest des zones déjà exploitées, et aussi vers l'Est en direction de Rouge.

Au total, ils auront consisté en l'ouverture de 2 075 mètres de nouvelles galeries et recoupes et en l'exécution de 7 165 mètres de sondages fond et jour.

Les résultats sont décevants : la minéralisation se poursuit bien, mais à des teneurs de plus en plus faibles, trop basses pour envisager une reprise de l'exploitation. Cette phase de recherches se termine par un rapport de résultats des derniers sondages effectués dans le secteur nord de Bentaillou (J.-P. Prouhet, janvier 1958). Ce rapport ne concerne qu'une série de 56 sondages sur un secteur bien précis de l'exploration faite depuis 1955. Il reste factuel et ne reprend aucune autre considération. Il est cependant cité à de nombreuses reprises dans les rapports et la correspondance ultérieurs. Il semble qu'il ait pris toute son importance en devenant le premier rapport qui a sérieusement condamné l'exploitation du Bentaillou.

Quelques mois plus tard, le même auteur justifie les recherches effectuées de 1955 à 1957, en donne les résultats essentiels, motivant une poursuite des travaux qui devraient cependant être réorientés (novembre 1958, J.-P. Prouhet, inédit). Excepté pour le secteur nord-ouest de Bentaillou qui n'a pas été terminé, il pense que les recherches ne doivent plus se cantonner dans l'emprise des zones déjà exploitées. Il propose de les reprendre en reconsidérant le contexte géologique, avec des travaux de détail dans l'ensemble de la concession.

En 1958, l'U.M.P. dénonce le contrat d'amodiation signé avec S.F.M.S. en 1943, et cette société redevient seule responsable de l'exécution de la convention passée avec le B.R.G.G.M.

C'est le début d'une période de brouilles entre l'U.M.P., la S.F.M.S. et aussi le B.R.G.G.M. pendant laquelle procès, expertises et contre-expertises se succèdent. Ces affaires s'ajoutent au litige avec E.D.F., propriétaire de l'usine hydroélectrique d'Eylie, dont une des conduites forcées provoque des fuites d'eau importantes dans la mine, compromettant la sécurité.

A la suite de la résiliation par l'U.M.P. de la convention d'amodiation, la S.F.M.S. devait rentrer en possession de ses biens le 1^{er} avril 1958, mais, en fait, la restitution n'a eu lieu que le 10 juillet 1961 (rapport de la Société Française des Mines de Sentein, mars 1963). C'est ce qui explique que la production a repris juste après.

En effet, une tentative de redémarrage de l'exploitation est faite en 1962 par la S.F.M.S., dans la zone de Rouge, accompagnée de la reprise des anciennes haldes. Xavier Boubée de Gramont (février 1963) explique dans son rapport que Rouge est devenu le nouveau siège de l'exploitation depuis l'été 1962, après remise en état des chantiers et des bâtiments.

Cette dernière période d'activité ne dure que quelques mois. L'extraction de 70 à 80 tonnes par jour d'un minerai trop pauvre (7% Zn et 0,6 % Pb) est insuffisante pour assurer la survie de la mine. A cette époque, la S.F.M.S. commence à avoir un différent avec le B.R.G.G.M. à propos de la valorisation des travaux de recherches anciennement effectués dans la zone remise en exploitation. Ce dernier se plaint de ne pas toucher un retour financier des dépenses d'exploration qu'il y avait faites, tandis que la S.F.M.S. reproche au B.R.G.G.M. de ne pas lui avoir communiqué l'intégralité des résultats.

C'est probablement cette même tentative infructueuse de reprise qui est mentionnée (bien que datée de 1962) par Nicolas Stolojan et Jean-Claude Viland (1991) lorsqu'ils retracent (sur la base du dépouillement des archives BRGM) l'histoire des productions plomb-zinc en France. Un petit rapport anonyme fait également état de « sondages » effectués au cours de l'année 1962 par le Professeur Raymond Pulou, du Laboratoire de minéralogie de la Faculté des Sciences de l'Université de Toulouse.

Ce rapport donne, en 1963, une estimation des réserves géologiques qui semble très optimiste et non justifiée par des données précises. Bien qu'il n'y soit pas fait référence, ce sont probablement ces chiffres de réserves qui figurent dans le rapport de X. Boubée de Gramont, également de l'Université de Toulouse et daté aussi de 1963 (non publié).

Plusieurs articles parus dans la presse régionale ("La Dépêche du Midi") de fin octobre et début novembre 1968 témoignent de l'émotion de la population locale au moment de la vente aux enchères du matériel de la mine.

En janvier 1975, J.-P. Prouhet qui dirige à cette époque la Division Sud-Ouest des Recherches Minières Métropolitaines du BRGM à Toulouse condamne définitivement

les mines de Bentaillou-Rouge (rapport BRGM non publié). Il explique qu'elles ne doivent être considérées que comme "une zone de recherches dans le cadre de la concession", des indices existants vers le Nord (lac d'Albe et étang d'Araing), et par ailleurs vers l'Est, qui doivent être aussi examinés mais avec prudence vu la difficulté des conditions d'accès.

De plus, il fait remarquer que la vétusté des installations de la mine nécessiterait une remise en état et une modernisation avant toute reprise d'exploitation.

La correspondance conservée au BRGM fait état de l'intérêt porté à Sentein par de nombreux opérateurs miniers français et étrangers au cours des années 70. Un syndicat est notamment créé entre le BRGM et la Société Minière et Métallurgique de Peñarroya de 1962 à 1965. Mais les avis convergent pour affirmer qu'une reprise de la production ne peut être justifiée que par les réserves encore disponibles dans les secteurs anciennement exploités. Il serait indispensable d'entreprendre de gros travaux de prospection pour identifier de nouvelles réserves, vers des extensions de la mine, ainsi qu'en direction d'indices voisins, et en reconsidérant le contexte géologique.

L'attitude du concessionnaire de l'époque et le risque lié à la prospection dans un contexte de baisse des cours des métaux ont figé le dossier des mines de Sentein.

3.6. ACCES ET EQUIPEMENT

L'ensemble appelé "mines de Sentein" ou "mines du Bentaillou" est situé dans la montagne surplombant le cirque de la Plagne, sur le versant sud ouest du Pic de l'Har, entre l'étang d'Araing à l'Ouest et Le Bocard à l'Est. Il s'étage de 1650 mètres (galerie de Rouge) à 2070 mètres (affleurement d'Espeleta), c'est à dire de 725 à 1150 mètres au-dessus du lieu-dit "Le Bocard", terminus de la route carrossable où étaient installés les bureaux et ateliers de concentration du minerai.

Cette situation en montagne, d'accès difficile, souvent enneigée a toujours été un gros handicap pour l'exploitation.

Deux voies d'accès sont possibles (R. Pulou, 1981) : la plus longue est le chemin qui peut être carrossable à la belle saison, par le cirque de la Plagne et le bois de Ruérech ; l'autre est le sentier de service du téléphérique, par les prairies du Bocard et le bois et prairies de Rouge. Trois heures sont nécessaires pour gravir les 4 kilomètres jusqu'aux baraquements principaux à 1875 mètres. La neige qui rend parfois difficile l'accès au Bocard par la route interdit l'accès à la mine pendant toute la saison hivernale.

Dans ces conditions, l'évacuation du minerai du Bentaillou jusqu'au Bocard a toujours été un problème majeur qui a été résolu de différentes manières au fil des années. On a tout d'abord utilisé les moyens de transport traditionnels de la région, c'est à dire des charrettes ou des convois de mulets qui descendaient les sacs de minerai et remontaient le matériel et les vivres pour les mineurs.

A partir de 1862, un système ingénieux a été mis en oeuvre. Le minerai était déversé dans un canal très fortement incliné, et entraîné par un violent courant d'eau jusqu'au bas

du cirque de la Plagne. Là, il était chargé sur des wagonnets qui descendaient par gravité sur une voie justement inclinée. Ils étaient retenus par un câble et entraînaient la remontée des wagonnets vides dans l'autre sens. Ce moyen de transport, lui aussi tributaire de la neige et du gel n'a fonctionné que pendant quelques années.

Pour pallier cet inconvénient, on a commencé dès 1866 à installer un téléphérique qui pouvait fonctionner toute l'année. Il a été remplacé par un second téléphérique en 1904, d'une capacité de transport de 2 500 tonnes par mois. Avec une longueur de 3,3 km, il reliait la station supérieure de Narbonne, celle de Rouge, et enfin la station terminale du Bocard, où arrivait ensuite également le téléphérique de Bulard. Il semble que cet équipement ait bien fonctionné jusqu'à la fermeture des mines en 1957.

3.7. LES INSTALLATIONS DU BENTAILLOU

On peut diviser les travaux miniers du Bentaillou en deux zones, comme le fait D. Fert (1976) :

3.7.1. Les travaux anciens

Ils correspondent aux niveaux les plus riches et ce sont ceux qui ont été exploités du début à la fin de la période d'extraction (1853-1953). Ils s'étendent depuis les bâtiments de la mine, au lieu-dit le Bentaillou à 1870 mètres et montent vers l'Ouest jusqu'à Espeletta, à la cote 2070.

L'ensemble représente un périmètre de 800 x 250 mètres (seulement 600 x 200 mètres d'après J.-P. Destombes, J. Lougnon, J.-P. Prouhet, 1955, et 1000 x 300 à 400 mètres d'après G. Pouit, 1986). Il est parcouru par plus de 7 km de galeries dont le tracé est assez confus. Ce réseau se prolonge jusqu'au niveau 1740 par une galerie qui atteint la deuxième zone des travaux.

3.7.2. Les travaux récents

Ils correspondent à un ensemble de travaux de reconnaissance des niveaux minéralisés le long du contact supérieur de la formation de Bentaillou vers le Nord et l'Est. Ces secteurs n'ont jamais donné lieu à une réelle exploitation.

Ils comprennent des extensions dans la partie supérieure du gisement, au delà de la faille d'Espéléta, mais surtout le secteur de Rouge, à l'Est du Bentaillou. Le travers-bancs (31) de Rouge, qui avait été entrepris en 1948 était un ouvrage de reconnaissance, mais il a un tracé qui pouvait en faire davantage une galerie d'exploitation (J. Lougnon, 1954). A cette époque, on avait donc un bon espoir de poursuivre l'exploitation dans ce secteur.

Le rapport de J.P. Prouhet (1956) permet de situer l'époque finale des travaux de reconnaissance sur l'ensemble du gisement et il compromet déjà cet espoir de voir l'exploitation s'étendre vers la zone de Rouge.

Le tracé de ces travaux récents ne figure pas sur bon nombre de plans des mines de Sentein. C'est peut-être parce qu'ils ne représentent pas une zone exploitée, mais surtout parce qu'ils sont appelés "travaux de Rouge", et bien que faisant partie du même ensemble, ils sont distingués des travaux dits de "Bentaillou", là où se trouvaient les quartiers d'exploitation.

Le téléphérique était divisé en deux sections. Narbonne était la station supérieure, à 1940 m d'altitude, juste au-dessus des constructions du Bentaillou. De la station intermédiaire de Rouge (à 1550 m d'altitude à l'Est et en contrebas des travaux de recherches mentionnés ci-dessus), le téléphérique descendait jusqu'au Bocard, dans la vallée, à 950 m d'altitude (R. Pulou, 1981).

Les installations de Narbonne comprenaient également un atelier de pré-traitement du minerai, en particulier de concassage.

Les bâtiments du Bentaillou abritaient des ateliers, une cantine, des réserves de matériels et des logements pour les mineurs qui ne pouvaient pas redescendre tous les jours dans la vallée.

Pour l'ensemble des mines de Sentein, il faut enfin mentionner les installations du Bocard. C'est là que se trouvaient les ateliers de traitement du minerai, les entrepôts et ateliers pour le matériel, et les bureaux.

3.8. LE RESEAU DES GALERIES DE BENTAILLOU-ROUGE

Les premiers travaux d'exploitation ont commencé dans la partie ouest de Bentaillou, cette zone haute du gisement étant aussi celle qui a fourni les meilleurs rendements. A partir des meilleurs affleurements (32) dans le secteur d'Espéléta et en direction du Bentaillou, et après avoir commencé l'exploitation par de petites carrières, les anciens mineurs avaient creusé des galeries pour exploiter les secteurs les plus riches.

Le creusement des galeries a ensuite progressé de proche en proche pour suivre la minéralisation la plus rentable, et parfois un peu au hasard, jusqu'à constituer un réseau très complexe.

Pendant cette phase de l'exploitation, la galerie appelée Narbonne, au tracé relativement droit, était la galerie principale. Elle a été longtemps la galerie la plus basse, et permettait le chargement et le roulage des wagonnets de minerai depuis les chantiers d'abattage (33) jusqu'à l'arrivée au jour, à la station du téléphérique.

Au fur et à mesure de la progression des travaux, de nouvelles galeries ont été creusées plus à l'Est, et ont formé un nouveau réseau, cette fois à un niveau inférieur à la galerie Narbonne. Une nouvelle galerie majeure était la galerie Saint-Jean, qui débouchait au jour (c'est à dire en surface) au niveau 1875, par deux sorties toutes proches des installations du Bentaillou.

Son tracé ne permettait pas le roulage du minerai. Celui-ci devait donc d'abord être remonté jusqu'à la galerie Narbonne pour être ensuite descendu dans la vallée (R. Pulou, 1981). Pour éviter cette pratique illogique coûteuse en temps et en énergie, et aussi dans l'optique de l'exploration du gisement plus bas et plus loin vers l'Est, il avait été entrepris d'ouvrir une galerie débouchant près de la station de Rouge, au niveau 1650.

Cette galerie appelée "travers-bancs de Rouge", de large section, préfigurait une future exploitation dans cette extension du gisement, et elle était destinée à devenir un niveau de roulage du minerai en contrebas des chantiers d'abattage. Les travaux furent arrêtés après 950 mètres sans que l'on ait atteint la minéralisation principale. Ce travers-bancs débute près de la station du téléphérique de Rouge, au Nord de la falaise, et il a une issue à l'Ouest, appelée "fenêtre de Rouge", juste au-dessous du chemin du Bocard.

Parmi les derniers travaux importants de recherches, dont le programme avait été établi en 1954, une série de sondages fond (appelés ainsi parce qu'effectués depuis une galerie) a nécessité l'ouverture d'un dernier travers-bancs au niveau 1740. Une descenderie (34) relie son extrémité ouest aux deux galeries principales, Narbonne et Saint-Jean. A l'Est, il débouche au jour près du chemin du Bocard, un peu au dessus du virage de la Cigalière.

Il faut enfin mentionner le niveau 1550, qui s'ouvre à proximité de la station de Rouge et au même niveau, mais qui n'a pas d'ouverture du côté du chemin.

En dehors des galeries principales mentionnées ci-dessus, il existe un grand nombre de galeries secondaires, en particulier dans les secteurs exploités. Leur tracé complexe a été dicté par le souci permanent d'atteindre les zones les plus richement minéralisées.

L'ensemble des mines de Bentaillou-Rouge représente un réseau total de plus de 10 kilomètres de galeries.

3.9. METHODE D'EXPLOITATION

Au début de l'exploitation, les mineurs avaient commencé à extraire en carrière le minerai visible depuis les affleurements d'Espeletta, vers la cote 2070. Ils ont ensuite progressé, un peu en carrière et surtout en souterrain, en suivant les amas minéralisés jusqu'à la cote 1875, avec la galerie Saint-Jean, et encore en descendant suivant le

pendage jusqu'à la cote 1828, la galerie Narbonne étant toujours utilisée pour le roulage du minerai.

Dans les zones supérieures de Bentailou où l'exploitation est la plus ancienne, le tracé des galeries ne semble pas répondre à une méthode cohérente. Nous avons vu qu'un bon nombre des premiers mineurs de la région était peu qualifiés. Ils devaient se contenter de suivre au jour le jour les parties les plus riches de la minéralisation. La géologie de la région était mal connue au milieu du 19^e siècle, et la gîtologie du gisement (35) l'était encore moins.

Au fur et à mesure de l'acquisition de l'expérience des mineurs et des connaissances sur le gisement lui-même, l'exploitation s'est orientée vers la méthode plus rationnelle des "chambres et piliers", qui se déroule en deux phases.

Au cours de la première phase appelée « traçage », on ouvre une série de galeries parallèles qui suivent le niveau à exploiter, et qui délimitent deux premiers côtés de ce qui sera la future « chambre ». A partir de ces deux galeries, on perce de place en place le minerai qui gît entr'elles par des recoupes qui achèvent de délimiter les futures chambres, et permettront la circulation et la manutention. On commence alors à attaquer l'extraction de chaque parallélépipède de minerai ainsi délimité. Ils sont recoupés par de petites galeries appelées refentes, qui laissent la quantité minimum de roche en place de manière à assurer la tenue de l'ensemble des terrains. Pour prévenir l'effondrement des parois au fur et à mesure que l'extraction du minerai génère du vide, on laisse ainsi de place en place des piliers de minerai intacts qui sont appelés aussi les stots. Les dimensions des chambres et des piliers ainsi que leur proportions respectives dépendent de l'épaisseur du niveau à exploiter et des paramètres de tenue des roches : cohésion, dureté, fracturation, venues d'eau, etc...

Au sens aujourd'hui le plus communément répandu, le « dépilage » est l'action de vider la chambre de son minerai et, par extension, le mot désigne parfois le vide créé (exemple : « on pénètre dans un vaste dépilage de 30 m de hauteur »). Mais à l'origine, le mot dépilage désignait la seconde phase (optionnelle) de la méthode d'exploitation par chambre et piliers, qui consiste à « enlever les piliers » c'est-à-dire retirer le maximum de minerai restant encore dans les piliers. Les piliers résiduels peuvent être alors abandonnés, mais dans certains cas, ils peuvent être foudroyés pour récupérer le maximum de minerai encore, ce qui rend ensuite la zone inaccessible.

Le fait qu'on ait laissé des piliers abandonnés, comme dans la mine du Bentailou, ne signifie pas pour autant que l'on puisse accéder sans danger à d'anciens travaux miniers laissés sans entretien. Avec le temps, la décompression des terrains, les venues d'eau, provoquent inévitablement des affaissements et des chutes de blocs.

A Sentein, les terrains avaient généralement une très bonne tenue dans l'ensemble des galeries à l'époque de l'exploitation. Le boisage qui était le mode de soutènement habituel a été rarement nécessaire et la roche est restée visible.

3.10. PRODUCTION DU BENTAILLOU

Il est difficile de connaître exactement la production de la mine du Bentailou. Il serait certainement possible de trouver des chiffres dans les archives des sociétés minières. La tâche est rendue difficile parce que le début de l'exploitation remonte à 1853, et du fait que plusieurs sociétés se sont succédées en plus de cent ans d'activité discontinue, et avec deux périodes de guerre.

La production a pu être évaluée en estimant le volume des vides laissés pour l'ensemble des galeries, et compte tenu de la densité moyenne de la roche minéralisée extraite, on en déduit son tonnage, c'est à dire la production totale de "tout-venant". La teneur moyenne du minerai permet ensuite de connaître le tonnage métal en place correspondant, qui (aux pertes de traitement près...) donne une idée de la production en métaux. On arrive ainsi à des chiffres globaux, sans avoir la production relative à chacun des épisodes.

De l'ensemble des documents consultés, il ressort que le total de la production peut être estimé à un million de tonnes de tout-venant, c'est à dire du mélange de minerai au sens strict et de sa gangue. C'est la production globale la plus souvent citée dans la littérature. La teneur en minerai, très riche dans les premiers temps, n'a cessé de décroître au cours de l'exploitation. Les auteurs donnent une teneur moyenne estimée globale de 10 à 12 % Pb+Zn pour un siècle de production effective. Cela représente 100 000 à 120 000 t de métal contenu, et certains auteurs arrivent même à 150 000 t (R. Pulou 1981 et G. Pouit 1985). Ils s'accordent pourtant à dire que le minerai contenait trois fois plus de zinc que de plomb, ce qui conduit à estimer la production métal totale à au moins 75 000 t de zinc et 25 000 t de plomb.

Le seul rapport contenant des chiffres de production assez détaillés est celui de la Société Française des Mines de Sentein (mars 1963), aujourd'hui classé comme confidentiel au B.R.G.M. Il donne pour la période allant de 1850 à 1905 une production globale de 150 000 tonnes de métal Zn+Pb, chiffre le plus élevé de toute la littérature pour le siècle entier de production de la mine. La production détaillée année par année de 1905 à 1953 se cumule à plus de 90 000 tonnes. On atteint ainsi le total de 241 000 tonnes métal, bien supérieur à tout ce qui est cité par ailleurs. Il semblerait donc que l'on doive considérer les chiffres de ce rapport avec circonspection.

Dans ces conditions d'incertitude, il est difficile d'avancer des chiffres de production propres à chaque période d'activité puisque celle-ci a été discontinue. De plus, non seulement le minerai était moins riche au fur et à mesure que l'exploitation descendait en suivant le pendage du contact calcaire-schistes, mais la proportion de galène diminuait de manière concomitante.

Beaucoup d'auteurs signalent la présence d'argent dans la galène, ce qui est un fait assez commun dans le monde, mais ne donnent aucun chiffre de production d'argent. D. Fert

mentionne qu'un peu d'argent natif a été signalé, et que la teneur moyenne en argent est de 650 g/tonne de galène. Lors de l'inventaire minéralogique de l'Ariège coordonné par Claude Laforêt, Pierre Monchoux, Elisabeth Oudin et Francis Tollon (1983) des minéraux d'argent en plages microscopiques ont été identifiés dans la masse du minerai (blende et galène dominantes) tant à Sentein qu'à Bulard (stéphanite, argentopentlandite, électrum, proustite). Finalement, Nicolas Stolojan et Jean-Claude Viland, dans leur synthèse nationale plomb-zinc de 1991 (p. 64), font état d'une production de 12 tonnes d'argent pour la totalité de la période 1848-1954. La proportion d'argent produit par rapport au plomb est environ dix fois moindre que la moyenne des autres gisements français, ce qui expliquerait que l'argent contenu dans la galène du Bentaillou, difficilement valorisable ou en trop faible proportion, n'a pas donné lieu à une production significative.

3.11. LES RESERVES DE L'ENSEMBLE BENTAILLOU-ROUGE

Il convient tout d'abord de préciser que le terme de "réserve" désigne une quantité de minerai qui a été déterminée par un calcul assis sur des données précises, qui est accessible au mineur et économiquement exploitable à un moment donné. Le terme de "ressource" correspond à une définition géologique pour désigner la présence de minerai identifié sans impliquer de notion économique.

L'extraction du minerai ayant été arrêtée en 1953 alors que, d'un avis unanime, les limites géologiques de la minéralisation n'avaient pas été atteintes, on s'est tout de suite penché sur la question des réserves de minerai restant à Bentaillou, dans les limites des travaux de l'époque. Le premier rapport qui traite sérieusement du sujet est celui de Joseph Balcon (ingénieur de grand renom à la Compagnie Royale Asturienne des Mines) daté du 28 septembre 1953.

Il y est dit que des quantités appréciables de minerai peuvent rester dans des zones inexploitées ou prématurément abandonnées. En particulier, il semblerait qu'à un niveau donné, l'exploitation se soit plus systématiquement étalée vers l'amont, délaissant la partie aval qui aurait autant de chances d'être aussi minéralisée.

Il pourrait y avoir des extensions verticales, pour des chantiers où l'on a exploité que l'horizon supérieur du minerai. L'auteur signale aussi que certains compartiments de failles ont été délaissés.

J. Balcon a signalé malgré tout que l'ensemble de tout ces restes ne pouvait représenter, "en étant optimiste, que 100 000 tonnes d'un minerai de qualité médiocre". La reprise de l'activité était donc subordonnée à la mise en évidence de nouvelles réserves. L'objectif d'un premier programme de recherches était de 500 000 tonnes de minerai, plomb et zinc confondus.

Le gros rapport de Jean-Paul Destombes, Jean Lougnon et Jean-Pierre Prouhet, de juin 1955, peut être considéré comme un rapport de fin d'exploitation, écrit par des géologues minier de grand professionnalisme qui connaissaient bien la mine de Bentaillou et sa région. Il y est alors indiqué à plusieurs reprises, que "rien ne permet d'affirmer que l'on ait atteint, dans n'importe quelle direction, les limites, soit de la lentille calcaire, soit de la zone minéralisée".

Cette considération ajoutée à d'autres observations géologiques avaient justifié l'important programme de recherches sous la direction technique du B.R.G.G.M. On pensait alors que le gîte de Bentaillou pouvait révéler encore d'importantes réserves, malgré les incertitudes géologiques.

Ce programme avait été défini avec l'U.M.P. en se fixant comme objectif principal, pour la première phase, de lever ces incertitudes géologiques, c'est à dire d'acquérir une meilleure connaissance du calcaire, de son extension, son épaisseur, son contact supérieur avec les phyllades, avec les contraintes d'atteindre la plus basse cote possible, de recouper la minéralisation perpendiculairement à son allongement, d'éviter les zones trop faillées, en utilisant autant que possible les voies d'accès existantes.

La phase suivante devait être consacrée à l'évaluation de la minéralisation proprement dite, en fonction des résultats précédents. L'exploration des autres anciennes exploitations et indices de la concession de Sentein devait se faire simultanément (J. Dufranc 1955).

Le programme de la deuxième phase (J.-P. Prouhet, 13 janvier 1956) énumère les travaux à faire dans l'emprise de la mine Bentaillou-Rouge, pour l'ensemble de l'année 1956 : zones Nord-Ouest et Nord Bentaillou et zone de Rouge. Il comprend le travers-banc qui sera finalement ouvert à la cote 1740, mais il ne mentionne pas de travaux à faire dans d'autres secteurs de la concession.

En mars 1957 (dans deux rapports), ce même auteur fait déjà état de résultats négatifs, sur le plan de la minéralisation, mais surtout sur le plan géologique. Dans la zone de Rouge, le calcaire s'amincit par érosion de la partie supérieure et passage latéral à des schistes, le minerai devient pauvre en blende au profit de la pyrrhotine. Dans la zone Nord-Ouest Bentaillou, le calcaire disparaît rapidement par passage latéral à des schistes. Il n'est donc plus question de parler sérieusement de réserves pour ces deux secteurs.

Poursuivant son balayage de la structure de façon méthodique sans écarter aucune possibilité, l'auteur conserve alors un certain optimisme, en particulier grâce à quelques résultats positifs dans la zone Nord Bentaillou dont l'étude est loin d'être terminée. Cet optimisme sera finalement tombé dans le rapport de janvier 1958. Sans abandonner tout espoir concernant la mine, il est davantage tourné vers l'extension des recherches sur les autres indices de la concession.

Cette attitude pourtant professionnelle entretint involontairement pendant tout le temps de la campagne de recherches l'idée que les réserves de la mine de Bentailou-Rouge n'étaient pas épuisées, et elle alimenta certainement quoiqu'en partie l'attente de la population locale pour une aide qui permettrait le redémarrage d'une exploitation qu'elle pouvait penser être encore viable. Cet état d'esprit est particulièrement bien reflété dans plusieurs articles parus dans un quotidien local bien diffusé "La Dépêche", sous la plume de Félix Napo, 30 et 31 octobre 1968, 2 novembre 1968.

Le résultat le plus manifeste qui transparaît dans les rapports à l'issue des travaux, c'est que presque partout le couple tonnage-teneurs est en-dessous des valeurs acceptables pour une mine souterraine à cette époque, et que de ce fait on ne peut jamais (sauf pour un ou deux panneaux hélas trop petits) parler de « réserves » au sens économique. On dirait aujourd'hui qu'en dehors d'un ou deux panneaux qui se révèlent insuffisants à eux-seuls pour asseoir le projet industriel, les résultats sont presque partout marginaux, et qu'on ne peut pas parler de réserves mais seulement de ressources, c'est-à-dire d'un volume (important) de roche à teneur géochimiquement très anormale en plomb-zinc mais pas assez riche pour être prenable en considération dans les calculs. Les experts vont ainsi d'espoirs en désillusions, et leurs rapports successifs reflètent cette évolution de pensée.

Par exemple, le titre d'une note de J. Balcon et J.-P. Prouhet, datée de juin 1957, est assez significatif pour laisser espérer lire des chiffres précis de réserves : "Etude des minéralisations résiduelles dans l'emprise des exploitations de Bentailou...inventaire des minéralisations qui peuvent encore être exploitées ou découvertes...". Malheureusement, les auteurs reconnaissent tout de suite que les teneurs du minerai restant étant trop pauvres, elles n'ont pas été chiffrées, et le reste du rapport ne peut indiquer aucun tonnage de réserves.

On pouvait espérer disposer de chiffres d'une estimation assez rigoureuse des réserves, au moins à l'issue du gros programme de recherches de 1955-1957 dont la réalisation technique a été confiée au B.R.G.G.M..

Les rapports des campagnes de sondages comportent les coupes et les résultats des analyses chimiques, qui sont donnés à chaque traversée de corps minéralisé, et comportent les teneurs en fer, argent, zinc et plomb, ainsi que, pour ces deux derniers, séparément les teneurs en sulfures et en oxydes. A l'époque, on ne dispose pas au BRGM ni ailleurs de l'analyse multi-élémentaire de 20 éléments à la fois (qui sera généralisée progressivement en prospection minière 20 ans plus tard). Mais le choix des métaux analysés est bon et la méthode a fait ses preuves.

Dans son rapport de fin de campagne de janvier 1958, J.-P. Prouhet en tire une estimation globale des réserves par panneaux de géométrie simple en considérant une certaine zone d'influence autour des différents points d'impact des sondages, et en pondérant les informations en fonction de la densité géographique des intersections

minéralisées afin d'éliminer les effets de pépite. Il répartit les blocs, suivant le résultat des sondages, en secteurs "exploitables", "douteux", "inexploitables forts", "inexploitables faibles", et "stériles", puis il calcule les proportions de chaque catégorie. A cette époque on ne dispose pas encore de calculs géostatistiques ni même de tableurs de type Excel (!) et l'auteur fait tous ses calculs à la main, par la méthode des blocs. C'est une méthode éprouvée qui est tout-à-fait fiable à ce stade de l'exploration.

Il définit ainsi quatre plages minéralisées, et ses commentaires sont significatifs : "seule la première plage a donné lieu à des travaux de certification. Les autres sont réparties dans l'ensemble de la surface étudiée et ne présentent que des points n'ayant donné lieu à aucun travail de précision. La plage n° 2 mérite certainement étude"...pour laquelle un tonnage de 200 000 tonnes à 2 % de plomb et 3,80 % de zinc lui paraît un peu élevé. Les autres plages pouvant renfermer un tonnage au moins égal, il conclut : "le tonnage probable de la zone étudiée serait donc de l'ordre de 500 000 tonnes, à des teneurs proches de celles citées plus haut".

Autrement dit, J.-P. Prouhet se rend à l'évidence dans ce rapport que même en concevant un abattage sélectif du seul panneau le plus riche, le projet ne passe pas la barre. Seul le premier panneau (la première « plage ») a montré des caractéristiques acceptables qui ont justifié des travaux complémentaires pour cuber ses réserves certaines (prouvées), mais les autres panneaux (« plages ») présentent des caractéristiques insuffisantes ou (au mieux) marginales qui ne peuvent en aucun cas les faire qualifier de « réserves ». Et encore, même les teneurs les moins mauvaises sont entachées de doute car il n'y a pas assez d'impacts analogues autour du premier pour garantir qu'on n'est pas trompé par un effet de pépite. Dans ces conditions, l'auteur ne peut donner que des « réflexions » à propos du reste des réserves (probables et possibles) de l'ensemble Bentaillou-Rouge, sans pouvoir préciser les chiffres.

En tout état de cause, les travaux d'exploration effectués après l'arrêt de l'exploitation n'ont rencontré que des corps minéralisés trop peu développés, avec des teneurs trop faibles en zinc et quasiment nulles en plomb. D'autre part, les observations géologiques ont révélé la réduction rapide de l'épaisseur de la lentille du calcaire de Bentaillou vers le Nord et le Nord-ouest, et donc une terminaison probable (fermeture) de la minéralisation exploitable.

La note de novembre 1958 de J.-P. Prouhet donne une bonne synthèse des résultats à l'issue des travaux de recherche. Ils se sont déroulés dans trois zones :

- zone de Rouge, entre la surface et la cote 1550 : la recherche de guides lithologiques et métallogéniques a été négative, et ce assez nettement pour que l'on considère cette question comme réglée ;
- zone nord ouest Bentaillou, entre les cotes 1850 et 1975 : c'est une zone de transition et une recherche aux alentours immédiats serait sans succès ;
- zone nord Bentaillou, entre les cotes 1750 et 1850 : elle comprend un premier secteur contenant des réserves certaines, d'autres probables, un second au potentiel

limité, et un dernier secteur relativement intéressant mais qui n'a pas pu être étudié durant la dernière phase des travaux.

Il n'y a finalement pas de chiffres, mais une conclusion disant que les problèmes concernant la zone de Bentaillou ont été délimités. Les réserves supplémentaires de quelques centaines de milliers de tonnes qui auraient encore pu être mises en évidence ne justifieraient pas à elles seules une reprise de la mine. Il faudrait y ajouter des réserves qui pourraient être découvertes par l'étude d'autres indices voisins dans la concession, en réorientant les recherches à la lumière des nouvelles connaissances.

On peut tout de même trouver dans certains rapports des chiffres de réserves établies (?) ou supposées, et de réserves qu'il serait nécessaire de prouver pour justifier la réouverture de la mine. Ces réserves, parfois confondues avec des ressources, varient tant d'un auteur à l'autre qu'il n'est pas nécessaire de tous les citer.

Ainsi beaucoup de chiffres de réserves assez fantaisistes sont relevés dans la correspondance, dans des rapports non professionnels et dans des coupures de la presse locale (nombreux, non datés ou anonymes, ou faisant partie de rapports confidentiels, ils ne sont pas cités dans les références bibliographiques). Ils sont la plupart du temps exagérément optimistes et témoignent de la volonté d'encourager les industriels et l'administration à la réouverture des mines.

Le seul rapport comportant des chiffres de réserves assez précis est celui de Xavier Boubée de Gramont (1963) alors doctorant à l'Université de Toulouse et qui se révéla rapidement un géologue minier de grand professionnalisme. Il détaille les quantités de minerai pouvant selon lui rester dans chaque chantier d'exploitation ou dans chaque secteur où les travaux de recherches ont donné quelques résultats positifs. Ses différentes évaluations pour chaque panneau se résument ainsi :

- zone de Bentaillou (emprise de l'ancienne exploitation) : 50 000 tonnes à des teneurs probables de 7 % Zn et 3 % Pb ;
- minéralisations prématurément abandonnées dans des chantiers en cours d'exploitation : 90 000 tonnes ;
- extensions immédiates vers l'aval : 70 000 tonnes
(soit plus de 200 000 tonnes pour la seule zone de Bentaillou, déjà exploitée et ne nécessitant donc pas d'installations onéreuses) ;
- zone Nord Bentaillou : 250 000 tonnes, dont 160 000 à 7-8 % Zn et 2-3 % Pb ;
- zone de Rouge : 200 000 tonnes, dont 40 000 à 5-7 % Zn et 1% Pb.

Le total atteint 650 000 tonnes de tout-venant.

L'auteur reconnaît toutefois que tout ne peut être classé en réserves certaines, qu'une partie est à classer en probable, et que les critères manquent pour trancher. En outre, il remarque lui-même qu'en dehors du panneau de 160 000 t à 10 % métal de Nord-Bentaillou bien reconnu par le BRGGM (mais qui ne représente que 16 000 t métal au

mieux, avant dilution !) les teneurs indiquées ailleurs restent souvent un peu ou très faibles et les puissances incertaines. D'autre part, il souligne que les autres réserves prises en compte dans cet inventaire sont en grande partie basées sur de petits amas de 10 000 tonnes ou moins dont la reprise reviendrait assez cher. D'autres, en amas plus importants, correspondent à des évaluations non certifiées, autour d'un ou plusieurs sondages BRGGM positifs, et leur mise en exploitation supposerait une grosse préparation. Enfin, il n'est pas précisé d'où X. Boubée de Gramont qui était universitaire à Toulouse en 1963 tire certains chiffres qui ne figurent pas dans les autres rapports connus.

Finalement, dans une courte note datée de 1975, Jacques Bertraneu, responsable des recherches minières "France-Europe" du B.R.G.M. qui a dirigé et suivi tous les travaux miniers pyrénéens avec grande conscience et expertise depuis près de 20 ans, semble condamner définitivement le gisement. Il reconnaît que ce sujet est intéressant, mais il demanderait un investissement assez lourd sur 3 à 4 ans, en se fixant comme objectif minimum de trouver de 2 à 3 millions de tonnes de réserves à 8-10 % de plomb + zinc, afin d'installer une exploitation moderne de 500 à 1 000 tonnes par jour, compte tenu du handicap géographique et de l'altitude. Pour Sentein c'est un objectif possible mais incertain et difficile.

Dans la synthèse nationale plomb-zinc de N. Stolojan et J.-Cl. Viland (1991) et sur la carte minière de la France de P. Béziat et M. Bornuat (1994), Sentein est classé comme un gisement français de zinc et plomb de moyenne importance avec une production métal de 25 000 t Pb, 75 000 t Zn et 12 t Ag, des réserves de 650 kt tout-venant représentant en métal 15 000 t Pb et 45 000 t Zn, et des ressources de 200 kt tout-venant à 7 % Zn+Pb c'est à dire au total environ 200 000 t métal qui placent le gisement en seconde position dans les Pyrénées derrière celui de Pierrefitte.

3.12. GEOLOGIE DE LA MINE DU BENTAILLOU

3.12.1. Les références bibliographiques concernant la géologie et la géologie du Bentailou

Il n'a pas été trouvé de document géologique datant des débuts de l'exploitation du gisement. On peut se demander si les anciennes compagnies minières elles-mêmes auraient de vieux rapports archivés. L'étude des archives notariales pourrait être également probante.

Il semble que depuis les débuts de la mine jusqu'à sa réouverture en 1941, les exploitants successifs se sont contentés des grandes études de géologie générale effectuées sur l'ensemble des Pyrénées, comme les travaux de Léon Bertrand de 1907 et 1940, puis ceux d'Eugène Raguin en 1944. Avec quelques études plus ciblées sur le

centre de la zone axiale qui leur ont fourni les indications lithostratigraphiques et tectoniques, ils avaient des indications suffisantes pour le suivi de la mine qui ne posait alors aucun problème de réserves.

Le premier rapport réellement géologique sur la concession de Sentein est celui de Victor Lebedeff, daté de 1943 (parfois 1942 ?). Victor Lebedeff est alors un géologue minier de renom et de grande expérience, puisque par exemple c'est lui qui six ans plus tôt en Guyane a jeté les bases du développement du célèbre gisement d'or de Paul Isnard. Il visite aussi les gisements du Val de Burat (concession CRAM de Marignac).

Pour Sentein, ce rapport est le plus ancien qui soit mentionné dans la bibliographie. Il semble que l'on se soit préoccupé de commencer des études géologiques juste avant l'arrêt de la production, au moment où la survie de la mine était remise en question. Il fallait alors absolument trouver de nouvelles ressources pour espérer reprendre la production. V. Lebedeff en fait justement la remarque : "...les anciens exploitants qui avaient à la portée de la main des masses importantes du minerai sans le chercher ni, surtout, sans chercher ses origines. A cette époque, l'exploitation n'était jamais précédée de recherches..."

Une note manuscrite anonyme datée du 31 mars 1955 fait un inventaire rapide de la documentation disponible sur le gisement. En dehors du rapport V. Lebedeff cité ci-dessus et d'une "étude Balcon limitée" qui a dû rester dans les archives U.M.P., elle ne mentionne que le rapport de J. Lougnon (juillet 1954) et la thèse de S.N. Visvanath alors encore en préparation. Celle-ci sera soutenue en mai 1955, et dans son mémoire paru seulement en 1957, Visvanath déplore qu'il "n'existe aucune publication relative à la géologie de la mine".

Il y a donc une grande lacune d'informations géologiques pendant toute la durée de l'exploitation de la mine. A partir de 1954 et jusqu'à 1958, hormis la thèse de S.N. Visvanath, il n'y a toujours pas de publications, mais de nombreux rapports et notes non publiés, qui ont été écrits par les géologues attachés à la mine, ou mandatés pour établir des comptes-rendus de travaux ou de visites.

3.12.2. Les connaissances anciennes, du début jusqu'à l'arrêt de l'exploitation (1853-1958).

L'extraction du minerai a été arrêtée en 1953, mais l'activité a été poursuivie de manière continue par des travaux de recherche jusqu'à la fin de 1957. Elle a donné lieu à la rédaction de nombreux rapports de géologie minière jusqu'à 1958, ce qui explique le choix de cette date coupure. Après quelques années de lacune, des ouvrages de caractère

différent ont été écrits : thèses universitaires et publications scientifiques de métallogénie (36).

Lebédeff décrit le gisement "sous forme d'amas ou couches minéralisées en blende et galène au contact entre calcaires au mur (37) et schistes au toit (38), attribués à l'Ordovicien". Depuis Espelétat, à l'Ouest, le contact minéralisé peut être suivi sur 2,5 km., jusqu'à la station de Rouge. En continuant vers l'Est, le calcaire de Bentaillou devient plus mince et disparaît dans les schistes. L'épaisseur de la minéralisation est très irrégulière, mais globalement, elle diminue d'Ouest en Est. Elle peut être très réduite et même disparaître, mais elle constitue parfois des lentilles de plus de 10 mètres de puissance.

La répartition du minerai est également décrite dans le rapport J.-P. Destombes, J. Lougnon, J.-P. Prouhet de juin 1955. Il est situé dans le calcaire, au contact supérieur de la lentille. Sa puissance varie de 0 à 15 mètres. Dans ce dernier cas, on distingue un horizon supérieur constant et riche, et un horizon inférieur plus diffus, les deux étant séparés par un banc stérile. Là où le banc stérile était absent, les chantiers ont été superposés, ou bien ouverts sur de grandes hauteurs (les "cathédrales" du jargon des mineurs).

Ces auteurs décrivent brièvement l'association des minéraux observables dans le minerai et dans la gangue (39). Cela leur suffit à conclure conformément aux modèles métallogéniques alors en vigueur que " le gîte de Sentein est un gîte de substitution mésothermal d'âge hercynien hautement probable.

Les anciens auteurs ont bien sûr mentionné la présence des grandes failles traversant le gisement. Ils y ont reconnu leur rôle dans la mise en place de la minéralisation, la plupart d'entre elles ayant fonctionné comme des zones de circulation privilégiée pour les solutions minéralisatrices. V. Lebédeff souligne aussi un rôle probablement inverse, les circulations météoriques depuis la surface ayant pu altérer certains corps minéralisés. Les différentes familles de failles n'ont pas joué le même rôle. Les anciens auteurs, comme les mineurs, se sont bornés à des observations de part et d'autre et dans les remplissages mais ne semblent pas avoir réellement étudié leur rôle génétique.

V. Lebédeff (1943) attribue un rôle prépondérant à la faille Saint-Jean, sans rejet, qu'il interprète comme un filon, d'après son remplissage (!) ; la grande faille Narbonne orientée Nord-Sud, postérieure à la minéralisation, mais accompagnée de filons de quartz minéralisés, ne fait qu'abaisser la partie est d'une dizaine de mètres, et la faille Saint-Louis dirigée Est-Ouest est vue comme un pli-faille.

Beaucoup d'auteurs s'accordent à dire que l'effet général des failles majeures sensiblement Est-Ouest est de relever le compartiment nord.

3.12.3. Les nouvelles connaissances, liées aux publications modernes, depuis l'arrêt de l'activité

La thèse de S.N. Visvanath (1957), bien qu'antérieure à la date de 1958 qui été posée comme une limite, est incluse dans ce paragraphe car elle a une optique géologique qui la rapproche davantage des études qui vont suivre que des rapports miniers qui sont écrits à la même époque. C'est la première étude complète, qui comprend d'abord le contexte géologique régional détaillé, puis les observations faites dans la mine.

Malgré l'irrégularité des amas de minerai, elle peut dégager des caractères généraux :

- leur toit est assez régulier, contre les schistes, mais leur mur est moins bien défini au contact du calcaire de Bentaillou ;
- les galeries suivent généralement le contact calcaire-schistes ; elles sont peu sinueuses, ce qui montre que ce contact n'est pas ou peu plissé à petite échelle, suivant la courbure du flanc nord de l'anticlinal du Bentaillou ; les coudes de certaines galeries sont le plus souvent à attribuer aux décrochements (failles) Nord-Sud suivis par les mineurs ;
- l'extension horizontale des amas toujours bien supérieure à leur épaisseur rend surprenant le terme de "colonnes minéralisées" employé par les anciens mineurs.

S.N. Visvanath montre que le gisement est parcouru par un système de failles orthogonales, toutes postérieures à la minéralisation. Il y a un ensemble de petites failles orientées N 80 à l'Ouest et infléchies N 100 à l'Est, dont la grande majorité fait abaisser le compartiment sud d'une dizaine de mètres. Les failles Nord-Sud décrochent le minerai surtout dans le sens horizontal.

Les failles principales sub-méridiennes ne sont pas minéralisées, mais un système de fissures de même direction lui est associé et il est, lui, porteur de blende et galène abondantes et en continuation avec la minéralisation de contact.

Les observations faites en mine et sur les carottes de sondages (40) confirment celles faites en affleurements : l'épaisseur du calcaire diminue rapidement vers le Nord et l'Est, confirmant que le gisement se trouve sur le bord de la lentille.

Le second ouvrage, par ordre chronologique, qui marque une avancée considérable dans la connaissance du gîte de Sentein, est la thèse de Didier Fert (1976) soutenue au Laboratoire de Géologie de l'Université de Paris VI dont le renom engendré par l'équipe de Pierre Routhier est alors à son apogée. D. Fert mentionne en préambule l'aide qu'il a reçue de la Société Française des Mines de Sentein et, au BRGM, de Georges Pouit géologue du BRGM spécialisé sur les gisements volcano-sédimentaires actuels et anciens, qui travaille à cette époque sur les Pyrénées dans le cadre d'une Action Concertée financée par la Délégation à la Recherche Scientifique et Technique. C'est une époque fertile qui commence pour les connaissances sur la métallogénie des Pyrénées, car le successeur de P. Routhier, le professeur Jules Glaçon, lance à cette

époque une série de thèses de doctorat de spécialité sur le sujet (Jean Reyx, Denis Charruau, Didier Fert, Yann Vernhet etc.). D. Fert multiplie les observations minutieuses de terrain et de laboratoire (cf. annexe 1). En conclusion, il remet en cause l'origine simplement hydrothermale de la minéralisation et esquisse le modèle volcano-sédimentaire élaboré avec G. Pouit.

Enfin, Georges Pouit (1986) publie à son tour lui-même le résultat de ses observations et une bonne description de la minéralisation. En premier lieu, il la qualifie bien de stratiforme (41). "Elle se présente comme un *run* (ensemble d'amas allongés), de direction Est-Ouest, avec des lentilles plurihectométriques riches, séparées par des zones quasi stériles pauvres". La minéralisation, qui comprend surtout de la blende, avec parfois de la galène, chalcopirite, pyrite, pyrrhotite peut être disséminée au sommet du calcaire de Bentailou jusqu'aux schistes sus-jacents, ou former des amas ou rubans massifs discontinus. Elle peut devenir massive sur 0,5 à 1 mètre de puissance. Le minerai a cependant rarement un aspect sédimentaire. Cette morphologie n'est pas due à la tectonique, bien qu'elle ait été accentuée par celle-ci.

3.13. L'ASSOCIATION MINERALE CARACTERISTIQUE

Les rapports les plus anciens décrivent des amas de quartz minéralisés en blende, soit en plages massives dans les remplissages, soit en imprégnation des calcaires ou des schistes. La galène peut y être associée intimement ou former des concrétions isolées, et sa proportion paraît plus élevée vers l'Ouest. La pyrite est considérée comme assez rare, plutôt concentrée dans une partie du gisement appelée Sainte-Amélie où elle forme une couche au toit du gisement, associée à de la pyrrhotine et à de la chalcopirite.

La plupart des auteurs relèvent que la teneur en plomb est nettement plus forte à la partie supérieure du gisement. Bien sûr, on peut trouver des amas de galène dans les niveaux inférieurs, mais elle tend à disparaître au-dessous du niveau 1600, et à Rouge, le minerai est uniquement constitué de blende.

C. Levy et J.-P. Prouhet (1960) ont établi une sorte de zonalité des paragenèses minérales en fonction de la profondeur. La zone supérieure à 1800 m renferme beaucoup de blende claire, de la galène abondante et très peu de pyrrhotine. Dans la zone intermédiaire (1800-1650 m), la proportion de galène diminue, le quartz est peu abondant. Dans la partie inférieure, jusqu'à la cote 1600, la pyrrhotine domine, le quartz est très abondant, la galène est rare, de même que la blende qui a une couleur très foncée.

S.N. Visvanath signale qu' "à l'échelle de l'échantillon, la pauvreté du minerai en espèces minérales est la chose la plus frappante". A l'oeil nu, les classiques sulfures de zinc (blende), plomb (galène), fer (pyrite et pyrrhotite) dominant. Les gangues,

également peu variées, sont composées presque uniquement de quartz et de calcite. G. Pouit (1986) souligne la présence au toit du niveau minéralisé d'intercalations lenticulaires métriques à plurimétriques, plus ou moins concordantes sur la stratification, de cherts chloriteux noirs et dolomies ferrifères rousses riches en amphiboles (trémolite, actinote) en gerbes. La minéralisation à blende dominante, parfois galène, localement chalcopryrite et parfois pyrite et pyrrhotite assez abondantes, est disséminée ou en amas et rubans massifs discontinus. Elle peut devenir massive (essentiellement la blende) avec une puissance de 0,5 à 1 m.

Même s'il existe parfois des rubans de sulfures ou une dissémination conforme à la stratification des calcaires, les minerais ont rarement un aspect sédimentaire. Cette morphologie complexe a été accentuée au cours de l'histoire géologique du gisement par la tectonique avec, en particulier, des boudinages dans les roches de compétence différente et le plissement des stockwerks, et par la recristallisation des gangues et des sulfures. Elle est aussi primaire, car on la retrouve dans des panneaux au contraire peu ou pas déformés.

La blende est généralement assez sombre, brun foncé à noire, comportant souvent des fissures occupées par de la galène. Ces deux minéraux sont associés dans la partie supérieure du gisement, la blende étant pure plus bas, vers Rouge.

Au microscope métallographique, on peut voir de la chalcopryrite et de la pyrrhotine au sein des plages de blende. La galène constitue un réseau de petites veines dans la blende et la pyrrhotine. L'argent est classiquement associé à la galène, mais sa teneur est plutôt faible ; de l'argent natif a été signalé sans que l'on puisse jusqu'ici en voir (D. Fert, 1976).

La pyrrhotine est assez fréquente. Elle forme de petits grains jaunes ou jaune orangé, et est le plus souvent associée au quartz. La pyrite a une répartition moins bien définie, elle se trouve plutôt dans les niveaux supérieurs de la mine, en petits grains dans la calcite, ou au sein de la minéralisation plombo-zincifère.

L'ordre de cristallisation des minéraux a une grosse importance dans l'étude des paragenèses minérales. Il a été observé qu'ici, la blende et la galène remplacent la pyrite (S.N. Visvanath, 1957), ce qui indique que la pyrite a pu être plus abondante.

Les autres minéraux classiques rencontrés sont la chalcopryrite, la covelline (sulfure de cuivre CuS), les cuivres gris, la bourmonite (sulfure antimoniure complexe de plomb, cuivre), et le mispickel qui est reconnu au microscope. Ils sont cités ici pour mémoire, car s'ils ont une importance certaine dans la paragenèse minérale, ils n'ont eu aucune influence sur le développement du gisement.

Au plan de curiosité mondiale en revanche, il faut citer un minéral rare et lui-même minéral d'un métal extrêmement rare (le germanium), à savoir la brunogéierite de composition Fe_2GeO_4 . Identifiée pour la première fois au monde à Tsumeb (Namibie)

elle est présente à Sentein (et Bulard) en cristaux microscopiques dans la blende, ainsi que dans plusieurs autres gîtes ariégeois de même type métallogénique notamment Carboire et Argut où elle est caractéristique et associée à d'autres minéraux de germanium jusqu'ici inconnus au monde (argutite, carboirite) ou rares (reniérte), et même dans le gisement de tungstène de Salau qui est d'un autre type (Laforêt et coll. 1983). Pour mémoire, rappelons que le Sud-Ouest de la France a une vocation privilégiée pour le germanium, peut-être inscrite au niveau crustal, puisque ce métal présent en traces dans les blendes en plusieurs points des Pyrénées a été assez concentré (sous forme de germanite) dans le filon de blende de Saint-Salvy (Tarn) pour y être récupéré industriellement (500 t Ge produites).

Parmi les curiosités (microscopiques) de Sentein plus classiques puisqu'on en connaît en plusieurs gîtes des Pyrénées ou d'autres socles paléozoïques français, on trouva aussi à Bentaillou de l'or natif en inclusions dans la blende et dans la gersdorffite parfois associé à la nickeline (et à Bulard de l'électrum, alliage naturel d'or et d'argent) tandis que l'ensemble Bentaillou-Bulard présente une signature géochimique assez remarquable avec de nombreux arsenio-sulfures ou sulfo-antimoniures de cobalt, nickel (ullmannite, clinosafflorite, gersdorffite etc.) à côté d'autres sulfo-antimoniures assez rares en France comme la ménéghinite. La blende et la galène comportent un peu de magnétite, qui est typique de la signature du gisement, contient elle-même un peu de gallium, et s'associe parfois à du mispickel, à or subordonné. A Bulard, l'association minérale est complétée de façon encore caractéristique par des oxydes d'étain (caassitérite) et de titane (sphène, ilménite), du bismuth natif et de la proustite (sulfo-arseniure d'argent). La présence de ce dernier minéral quoique microscopique confirme avec la stéphanite (sulfoantimoniure d'argent) trouvée dans la galène à Bentaillou la tradition selon laquelle de l'argent a pu être parfois exploité dans les deux mines, même à l'état de traces.

Les isotopes du plomb ont été étudiés par Eric Marcoux (1986) dans le cadre de son étude synthétique sur de nombreux gisements de plomb français. Ils présentent des caractères homogènes avec ceux des autres gîtes pyrénéens de même type volcanosédimentaire.

Pour être complet au plan de la géochimie régionale, il faut mentionner dans la région de Sentein (rapport BRGM de R. Carly, 1969) la présence assez systématique de vanadium (en teneurs faibles) dans les schistes carburés d'âge silurien (synonyme de Gothlandien), donc plus récents que les terrains ordoviciens de la mine. Ce vanadium n'est pas lié à la mise en place de la minéralisation en zinc-plomb, mais simplement associé à la matière organique d'origine naturelle des roches environnantes, comme le phénomène est connu en de nombreux autres bassins sédimentaires dans le monde. Cette étude du département Valorisation des Minerais du BRGM a été effectuée sur un échantillon de schiste, riche en graphite, contenant 3000 ppm (ou 0,3 %) de vanadium. Les conclusions des essais de traitement ont été globalement négatives, les faibles de teneurs de la roche au départ et les difficultés d'en extraire le vanadium excluant d'envisager un procédé industriel de rentabilité économique acceptable.

3.14. INTERPRETATION DU GISEMENT DE BENTAILLOU-ROUGE

Expliquer le gisement de zinc et plomb de Sentein consiste à la fois à décrire dans quel contexte géologique se trouve contenu le minerai, et aussi quand et par quel processus il est venu se mettre en place.

3.14.1. Géologie du gisement au sein de l'ensemble régional

Le minerai de Bentaillou se trouvant toujours un peu au sein du calcaire du Bentaillou, et surtout à son contact supérieur avec les phyllites, il est vite apparu que la connaissance de ce niveau calcaire particulier était primordiale pour expliquer le gisement. Dans le chapitre de géologie régionale, il a été replacé au sein de la série lithostratigraphique, mais il convient de donner quelques précisions sur son origine, car elle a un grand intérêt au plan scientifique.

V. Lebedeff (1943) a bien décrit le calcaire de Bentaillou comme une lentille dont l'épaisseur peut dépasser 200 mètres, en position normale dans la série de l'Ordovicien supérieur et avec des passages latéraux aux formations schisteuses dans toutes les directions.

S.N. Visvanath (1957), au cours de ses travaux terminés en 1955, avait soigneusement étudié le calcaire du Bentaillou. Il l'a décrit comme fortement métamorphique, ce qui explique que les fossiles qu'il pouvait contenir ont été rendus invisibles, et sa datation a ainsi été longtemps incertaine. Il l'a bien interprété comme une lentille calcaire au sein d'une série de schistes, mais n'a pas mentionné qu'il pouvait s'agir d'une ancienne formation récifale.

C'est J.-P. Prouhet le premier qui (dans son rapport de mars 1957), qualifie le calcaire d'ancien récif, sans justifier cette découverte d'ailleurs, et alors qu'il ne l'avait jamais évoqué dans aucun de ses rapports précédents.

D. Fert (1976), après avoir montré l'âge ordovicien supérieur du calcaire du Bentaillou, avait souligné son caractère particulier : c'est une grande lentille de calcaire, déposée sous une faible tranche d'eau, dans des conditions instables marquées par des apports détritiques fréquents (lits gréseux ou graphiteux). La minéralisation en zinc et plomb se trouve à son contact supérieur et il retient surtout sa liaison avec des faciès de shales ou siliceux riches en matière organique.

Y. Vernhet (1981) admet bien que ce calcaire se soit déposé dans un bassin de sédimentation peu profond, mais il lui conteste une origine récifale, parce qu'il est totalement dépourvu de fossiles et sa surépaisseur peut être due, selon lui, à la

tectonique. Il pense que la sédimentation carbonatée a été interrompue au moins deux fois par une sédimentation détritique terrigène riche en matière organique.

G. Pouit (1985, 1986), tout en déplorant l'absence d'étude de détail, remarque le contexte géologique et paléogéographique particulier du gisement : au croisement de failles N 110° et d'une grande fracture nord sud, à l'aplomb d'une zone amincie de l'Unité III au-dessus, à proximité de la terminaison brutale du calcaire de Bentaillou et de sa minéralisation vers le Nord Est dans le quartier de Rouge. Il s'accorde avec l'interprétation de C. Levy et J-P. Prouhet (1960) qui pensaient déjà que le calcaire de Bentaillou avait une origine récifale, tout en admettant qu'il "n'existe pas de preuves de l'existence de véritables récifs".

3.14.2. Gîtologie : mise en place de la minéralisation

V. Lebedeff (1943) avait déjà résumé que la couche, "ou plutôt la série des amas du minerai formant le gisement est localisée au contact supérieur entre le calcaire et les schistes". Il pense que les calcaires, cassants, ont favorisé l'ouverture de cassures qui ont servi de voies de circulation pour les fluides minéralisateurs, alors que les schistes au-dessus se sont comportés comme un écran imperméable. Les calcaires étant sujets à des dissolutions et substitutions se sont alors comportés comme une roche magasin.

Les idées de J.-P. Destombes, J. Lougnon et J.-P. Prouhet (1955) semblent assez voisines : un réseau de fractures ouvertes aurait permis le cheminement des solutions, les différents minéraux du minerai s'étant ensuite localisés en fonction de leurs aptitudes à la pénétration et à la précipitation dans le milieu calcaire qui a joué un rôle plus physique que chimique. Les calcschistes du toit ne leur semblent pas avoir été un écran parfait pour les solutions minéralisantes, les zones fracturées contenant aussi du minerai. Elles ont pu être arrêtées aussi par des intercalations schisteuses formant écran secondaire à l'intérieur du calcaire.

S.N. Visvanath (1957) a repris cette hypothèse, en écrivant : "les schistes ardoisiers ont joué le rôle de barrières imperméables à la minéralisation". La seule paragenèse observée lui permet de placer le gîte de Bentaillou dans le groupe des gîtes hydrothermaux à faciès mésothermal. Il reste dans le domaine des hypothèses concernant la composition chimique des solutions minéralisantes, mais ajoute des remarques sur la silicification qui se manifeste sous forme de filons de quartz antérieurs et postérieurs à la minéralisation.

Pour Visvanath, les solutions minéralisantes proviennent vraisemblablement des granites hercyniens. Or, dans le paragraphe "structure" du chapitre exposant la géologie régionale, il a été expliqué qu'un granite intrusif pouvait être accompagné d'une activité hydrothermale qui engendre des concentrations minérales. Le granite de ce type le plus

proche est celui du Ribérot, distant de 10 kilomètres, mais Visvanath ne l'évoque pas précisément comme origine des solutions minéralisantes.

Destombes, Lougnon et Prouhet (1955) avaient déjà attribué la venue des solutions minéralisantes aux granites post-hercyniens. De plus, ils décrivent un affleurement de roches dérivant d'un métamorphisme de contact à proximité immédiate de la mine. Ils en concluent la proximité d'un granite intrusif caché, mais proche : "la présence du granite, à quelque profondeur, sous la crête de Rouge, semble donc ici probable." Ils confortent encore leur idée par d'autres observations minéralogiques faites dans le même secteur.

La plupart des auteurs avaient remarqué que les meilleures zones minéralisées sont disposées en chapelets d'amas de minerai, alignés globalement Nord Ouest-Sud Est, ce que les anciens mineurs appelaient "colonnes" de minerai. Selon V. Lebedeff, cela correspondrait à de plus fortes concentrations de la minéralisation dans des voûtes, à la faveur de bombements, sous les axes des anticlinaux transversaux.

Le minerai se trouve au sommet du calcaire de Bentailou, contre le contact entre le cipolin et les quartzophyllades supérieurs, mais D. Fert (1976) confirme que le calcaire n'est jamais minéralisé dans sa masse. Selon lui, l'essentiel de la minéralisation se serait mis en place pendant la sédimentation, en liaison avec certains faciès de shales ou de faciès siliceux riches en matière organique. Il reconnaît aussi la possibilité d'un apport postérieur des métaux par le volcanisme, tout en lui réservant un rôle secondaire.

Dans les années 70, les hypothèses métallogéniques vont brusquement s'affiner à la lumière des découvertes sur la mise en place actuelle des minéralisations sulfurées liées aux rides médio-océaniques. C'est la période où, pour expliquer les minéralisations sulfurées stratiformes et les amas sulfurés liés au volcanisme sous-marin, les chercheurs se sont enfin débarrassés du modèle géosynclinal. En France, en parallèle à l'Inventaire minier métropolitain confié par l'état au BRGM en 1975, le BRGM développe alors les prospectes de Bodennec et Porte-aux-Moines en Bretagne et la SNEA le prospect de Rouez, tandis que sur la province pyriteuse sud-ibérique (Huelva) les équipes de André Bernard (Nancy) et Pierre Routhier (Paris) aboutissent à des modèles modernes. Jules Glaçon, successeur de Pierre Routhier au Laboratoire de Géologie Appliquée de l'Université de Paris VI, lance sur les minéralisations stratiformes des Pyrénées une série de doctorants (Didier Fert, Denis Charruau, Yann Vernhet etc.) en liaison avec Francis Tollon à l'Université de Toulouse et le BRGM. Dans le cadre d'une action concertée de recherche scientifique financée par l'état, des équipes pluridisciplinaires assurent un suivi géologique étroit de tous ces sujets miniers à la fois en Bretagne et dans les Pyrénées, avec l'aiguillon de la recherche de gisements cachés, et des moyens considérables (par exemple en métrage de sondages). Sur ce terrain revisité avec des yeux neufs c'est le moment des découvertes fondamentales de Georges Pouit, Jean Bouladon, Elisabeth Oudin, Françoise Aye, Edmonde Soler, Claude Alsac, G. Dagallier, P. Guérin, Didier Fert et Yann Vernhet sur les minéralisations volcanosédimentaires françaises.

Pour Y. Vernhet (1981), la mise en place des sulfures, dont font partie blende et galène, coïncide avec les changements de sédimentation (carbonatée / détritique) en relation avec une paléogéographie particulière et contrastée. Pour lui, la minéralisation du Bentailou, tout comme celle du Bulard dont il est question plus loin, est totalement indépendante de toute manifestation volcanique. Elle résulterait du démantèlement de concentrations en zinc et plomb antérieures, érodées à partir d'un continent voisin émergé. Le transport des éléments métalliques aurait pu se faire en solution, ou sous forme de fines particules, ou bien intimement associés aux argiles.

Enfin, G. Pouit (1985) fait un bilan des connaissances avec toute la maturité que procure des années de patientes recherches scientifiques en prise directe avec l'exploration minière en plusieurs points du monde. Il souligne que le caractère essentiel de la minéralisation du Bentailou est de former une couche au contact avec l'unité de schistes qui coiffe le calcaire récifal. Elle forme un ensemble d'amas allongés qu'il appelle "run", étroit, mesurant plus d'un kilomètre sur plusieurs centaines de mètres de large, avec des "flaques" plus riches à blende massive. Cette minéralisation s'individualise à la fois de façon stratiforme mais aussi de façon sécante sur la stratification, vers le sommet et sur les flancs de la lentille du calcaire récifal. Cette minéralisation discordante évoque bien les griffons des fumeurs noirs actuels.

Elle présente un aspect nettement hydrothermal, avec une gangue hydrothermale abondante caractérisée par des quarzites (anciens cherts métamorphisés) et une altération hydrothermale qui a développé de la séricite, des carbonates de fer et magnésium et de la chlorite ainsi que (dans le toit) de la tourmaline néoformée traduisant probablement une altération borée. G. Pouit (1978) associe aussi étroitement la minéralisation aux zones de failles et de flexures qui ont joué au moment de la sédimentation. Depuis le début de ses études des gisements des Pyrénées centrales, et en particulier concernant le gisement de Bentailou, il attache une très grande importance à la tectonique synsédimentaire, c'est à dire contemporaine de la sédimentation.

Selon lui, à Sentein, c'est une instabilité tectonique qui aurait déterminé la paléogéographie particulière observée, avec une série de petits bassins peu profonds, et avec parfois des manifestations volcaniques (G. Pouit, 1979). L'étude de cette tectonique synsédimentaire est susceptible de fournir des guides pour la recherche d'autres concentrations.

En conclusion, sur le plan métallogénique, G. Pouit confirme le caractère hydrothermal du gisement. Il "retrouve les trois caractères fondamentaux des minéralisations hydrothermales sédimentaires: dépôt à des périodes d'instabilité tectonique marquées par des failles synsédimentaires et une paléogéographie complexe, association de minéralisations concordantes et sécantes, et enfin manifestations hydrothermales associées aux minerais". Il remarque aussi l'homogénéité des faciès minéralisés, avec la dominante du zinc sur le plomb et la faible teneur en argent.

L'étude du cortège des minéraux montre à G. Pouit (1979) que la série stratigraphique a été soumise à une altération hydrothermale certaine, ce qui prouve l'origine hydrothermale de la minéralisation. "La minéralisation provient de solutions hydrothermales dont le lien génétique avec le volcanisme est mal connu, ayant circulé dans des failles et s'étant déposées sous forme de types morphologiques sécants (peut-être le cas de Bulard, voir plus loin) ou concordants."

Il affirme toujours en 1986 le caractère hydrothermal du gisement et le lie à une présence locale de volcanisme. Pourtant, il reconnaît aussi qu'à Sentein il « n'existe aucune preuve de l'existence de manifestations volcaniques » associées au dépôt de la minéralisation de Bentaillou ou le précédant.

Dernier épisode de l'ère Primaire, tous les terrains y compris la minéralisation synsédimentaire en zinc-plomb sont affectés par un métamorphisme de degré que les spécialistes classent dans l'épizone ou la mésozone, plus intense (biotite, sillimanite, cordiérite) dans une large auréole autour du granite de Bosost, moins intense autour comme à Sentein. Ce métamorphisme provoque dans le minerai des recristallisations et engendre de nouveaux minéraux (chlorites, etc.) tandis qu'avec la tectonique concomitante se provoquent schistosité, boudinages et plissements des roches encaissantes.

4. Les autres exploitations minières de la région de Sentein

4.1. INDICES ET EXPLOITATIONS DE LA REGION

Dans l'Ariège, au voisinage plus ou moins proche de Sentein, il convient de citer pour mémoire quelques autres gîtes minéraux qui ont parfois été exploités :

- le cuivre, exploité brièvement au début du 20^e siècle à Irazein, à 4 km au Nord de Sentein, à partir d'un minerai assez riche et également argentifère (Gol, 1998) ;
- le manganèse (mine de Las Cabesses) et le tungstène (Salau) qui ont été exploités dans des gisements un peu plus lointains ; l'information pour le cobalt est incertaine (D. Fert, 1976 ; Y. Vernhet 1981).
- le zinc et le plomb qui ont tout de même largement dominé dans les exploitations de la région (Hospice de France, Liat, Argut, Maratines, etc.).

Au plan administratif ou historique, outre la concession de Sentein, on distingue trois concessions :

- **la concession d'Orle** où la première demande répertoriée d'une autorisation de recherches date de novembre 1898 pour le compte de M. J. Raufaste ; la Société Anonyme des Mines de Montolieu (SAMM) effectue des travaux de 1903 à 1907 ; la concession a été instituée et concédée le 17 décembre 1907 à la SAMM, suite à la demande effectuée par celle-ci en date du 31 août 1905 pour la recherche de mines de zinc, plomb, argent et métaux connexes ; la superficie concédée était alors de 945 ha ; en 1908, la S.A.M.M. fusionna avec la Société des Mines des Borquettes qui exploitait alors le riche filon de blende du même nom à La-Londe-les-Maures ; le 9 août 1913 la superficie fut ramenée à 440 ha à la demande de la Société Nouvelle des Mines des Borquettes ; enfin, le 21 septembre 1961, la Société Minière et Métallurgique de Peñarroya ayant racheté un lot de concessions parmi lesquels tous les actifs de la Sté des Borquettes acquit par décret la concession d'Orle, comprenant les travaux de Bularic, Grauillès, Darnaca ; un arrêté préfectoral du 30 juillet 1987 a notifié à la S.M.M. Peñarroya l'engagement d'une procédure de retrait de concession ; mais le concessionnaire a sollicité la suspension de la procédure de retrait ; en dernier les droits appartenaient à Metaleurop ;
- **la concession de Bulard** instituée pour plomb, zinc, argent et métaux connexes par décret du 15 juin 1893 ; elle a été rattachée ensuite à celle de Sentein-Saint-Lary instituée le 25 septembre 1848 ; de ce fait la mine de Bulard a appartenu à la Société Française des Mines de Sentein jusqu'à la disparition de cette société ;

- **la mine de Fourcaye** située en Espagne ; ni le BRGM ni Yann Vernhet (1981) n'ont retrouvé dans les archives des diverses sociétés susceptibles d'être concernées des renseignements s'y rapportant ; on sait seulement que la SAMM exploitait déjà le gisement en 1907 (rapport du Service des Mines de Toulouse du 6 mars 1907) ; les indices d'Isil, Unaret, Tredos, Salardu, Bagerque, Gessa, Artiès, Vilach et Canejan ont fait l'objet d'une demande de permis de recherche le 27 mai 1972, institué le 2 septembre de la même année.

Au plan géologique, D. Fert distingue les indices qui, comme pour le gisement principal de Sentein, sont géologiquement situés dans le calcaire de Bentaillou ou à son contact supérieur, et ceux qui sont situés dans les quartzophyllades supérieurs (Ordovicien terminal, au dessus du calcaire de Bentaillou).

Le premier groupe comprend :

- **Bularic ou Bulard-bas** : travaux de recherches entre les cotes 1600 et 1650, présentant des analogies avec le secteur de Rouge, mais aussi quelques particularités minéralogiques et la marque de plissements (Y. Vernhet 1981 p. 121-143) ; de l'or est visible au microscope et un amas ferrugineux plurimétrique a livré à l'analyse 10 g/t Au (G. Pouit 1986 p. 12) ; cette ancienne mine est pointée sous le nom de « mine de Bulard » sur la carte topo IGN à 1/25 000 ; elle est située dans la concession d'Orle ;
- **Artignan** : trois galeries de recherche, aux cotes 2030, 2050 et 2075, sur le flanc nord-ouest de la May de Bulard, ont atteint une minéralisation en blende de 1,50 m de puissance dans le cipolin ;
- **Chemin du Past** : quelques petits indices réduits à l'Est du ravin de Tartereau et à l'Ouest de la fontaine d'Ardaing ;
- **Albe** : grattage de surface peu important, à 2430 m d'altitude, à l'Ouest de l'étang d'Albe ;
- **Araing** : petit indice d'accès difficile au Sud de l'étang d'Araing, dans une terminaison ouest du calcaire de Bentaillou ;
- **Pic Noir** : au pied de la paroi nord-ouest du Pic Noir, entre les cotes 2150 et 2180, plusieurs indices peu importants.

Le second groupe comprend plusieurs indices d'importance inégale :

- **Bulard**, qui a donné lieu à une véritable exploitation, sera développé plus loin ;
- **Portillon d'Albe** : indice très modeste, sur le coté est du Pic Blanc du Portillon, à la cote 2580, considéré par certains comme un filon dans les quartzophyllades supérieurs ;

- **Crabère** : ensemble d'indices plus importants en dehors de la concession de Sentein, sur le flanc nord du Pic de Crabère, entre les cotes 2250 et 2300, à proximité ou au contact du niveau repère de calcaire troué ; trois niveaux de recherches ont été tracés pour reconnaître ce bel indice à blende et galène qui n'a pas été exploité ;
- **Uls** : ancienne mine de plomb et zinc, exploitée à 1800 m d'altitude, à 2,5 km au Nord-Ouest des indices de Crabère, et dans le même environnement lithologique. La minéralisation se trouve dans une dizaine de filonnets quartzeux de 1 à 15 cm d'épaisseur et avait été interprétée comme hydrothermale par M. Kremer (1961).

4.2. LA MINE DE BULARD

La documentation disponible sur Bulard est beaucoup moins abondante que pour la mine du Bentaillou. C'est en effet un gisement de bien moindre importance, dont l'exploitation n'a duré que 25 ans, arrêtée depuis la fin de la première guerre mondiale. Il garde un intérêt scientifique, mais il est devenu quasiment inaccessible, autant à cause des chemins d'accès impraticables que de l'état dangereux des travaux miniers.

Il n'y a aucun article ou rapport datant de la période d'exploration ou d'exploitation (1878-1918). On peut penser que, comme au Bentaillou, les mineurs devaient se contenter de suivre la minéralisation de proche en proche.

La mine a été décrite et étudiée par les géologues qui recherchaient des extensions à la mine du Bentaillou qui venait de fermer (1954-1958). A la lecture des nombreux rapports écrits pendant cette période, il apparaît que l'on s'est de nouveau intéressé à Bulard quand l'espoir s'est réduit de certifier de nouvelles réserves dans l'ensemble Bentaillou-Rouge. A cette époque, la mine de Bulard était fermée depuis près de quarante ans. La voie d'accès qui était déjà difficile auparavant, était devenue malheureusement impraticable.

Il semble évident que l'on a repris l'étude de cette mine sans pouvoir la visiter, non pas dans l'espoir d'y découvrir de nouvelles ressources, puisqu'elle était réellement épuisée, et située dans un environnement très difficile, mais pour y retirer des guides de recherche pour de nouveaux gisements dans des contextes similaires.

A la fin de années 50, les auteurs travaillaient déjà d'après les quelques documents miniers existants, sans visiter la mine, mais seulement quelques extensions, comme Artignan vers l'Ouest. C'est encore le cas pour les auteurs plus récents, à commencer par les thèses de doctorat de géologie de S.N. Visvanath (1957), Yann Vernhet (1981) et Didier Fert (1976), qui se basent sur les documents précédents et sur l'étude d'échantillons prélevés sur d'anciennes haldes.

4.2.1. Localisation et accès

L'ancienne mine de Bulard est située tout près de la frontière espagnole (75 mètres, d'après V. Lebedeff, 1943!), sur les flancs N NE et N NW et presque au sommet du Pic

de la May de Bulard (2 752 m), 3,5 km à vol d'oiseau au Sud-Est du Bocard. Elle a été la seconde des mines de Sentein après celle du Bentaillou.

Appelée également "mine de la May de Bulard", ou "de Bulard-haut", cette exploitation a comme première caractéristique d'être située entre 2 500 et 2 600 mètres d'altitude, avec des conditions d'accès très difficiles, en grande partie responsables de son surnom de "mine mangeuse d'hommes", étant donné le nombre important de personnes tuées sur son chemin d'accès, qui n'était praticable que quatre à cinq mois par an. Il convient de signaler aussi que la galerie principale s'ouvre au sein d'une falaise.

Y. Vernhet explique, en 1981, que le chemin d'un mètre de large, taillé dans la roche au-dessus d'un à-pic de plus de 200 mètres, était en grande partie effondré, et le câble de maintien qui servait aux mineurs était rompu. D'autres accès étaient possibles, tous plus longs et, à l'époque, sans garantie sur leur état à cause d'éboulements et de chutes de pierres. Depuis le village de Luentein, un chemin monte au col de l'Arech au Sud-Sud-ouest, puis vers le Sud, et il est possible d'accéder aux anciens bâtiments de la mine, à 2400 mètres d'altitude. C'est là que se trouvent d'anciennes haldes d'où ont été prélevés les échantillons pour études pétrographiques et minéralogiques.

4.2.2. Historique de l'exploitation et production

Dans l'historique de la concession de Sentein, nous avons vu que tous les gisements de la région avaient été découverts dès le début des travaux de prospection, vers 1840, pendant les grandes explorations de la chaîne pyrénéenne. C'est le cas de la "Malh de Bulard".

Les recherches avaient continué au temps où la "Société des mines de plomb et de zinc de Sentein et de Saint-Lary" exploitait le gisement du Bentaillou, et aussi au temps de la société Kaulek qui a suivi.

La "Sentein Mining Company" anglaise hérite des résultats, continue les recherches en 1891-1892, et obtient une concession en 1893. Elle est citée comme "the Castillon Mining Company par Y. Vernhet (1981). L'exploitation démarre rapidement. Un petit train et un téléphérique sont rapidement construits pour amener le minerai au Bocard. La même société devient en 1902 la "Couserans Nescus Ltd" ou "Nescus Sentein Montcoustans". On installe un nouveau câble en 1902, alors que l'exploitation est en pleine activité.

La mine passe sous la direction d'un syndicat minier de 1906 à 1943, puis devient la propriété de la Société Française des Mines de Sentein (S.F.M.S.). Son activité avait cependant cessé à la fin de la première guerre mondiale, la date exacte d'arrêt variant de 1917 à 1919 suivant les auteurs.

L'exploitation a été faite par gradins droits (42) de 45 à 60 mètres de long et 15 mètres de haut, avec piliers (Y. Vernhet 1981). A partir de 1907, on passe à la méthode par gradins renversés et remblayage avec récupération des piliers.

Ce n'est qu'à partir de 1909 que les travaux sont reportés sur un plan au 1/500 et accompagnés d'une description.

D'après D. Fert (1976), le gisement aurait fourni 40 000 tonnes de tout-venant à 15-30 % de zinc, 1 % de plomb et 7 % de fer. Le concentré de galène à 70 % de plomb renfermait aussi 800 à 850 grammes d'argent par tonne. "Toutes les parties exploitables du gisement ont été entièrement épuisées" (V. Lebedeff, 1943).

La teneur du minerai n'a cessé de baisser au cours de l'exploitation. De 32 à 34 % de zinc et plomb en 1908 (jusqu'à 5 % pour le plomb), le tout venant était descendu à 8-10 % à la fin de l'activité en 1917. Yann Vernhet (1981) donne des chiffres concernant le rendement minerai marchand par rapport au tout-venant, tout aussi révélateurs, de 65 % en 1908 passant progressivement à 16 % en 1917.

Il semble donc que ce gisement ait bien été épuisé, se trouvant de surcroît soumis à des limites de teneurs très élevées imposées par les conditions difficiles de cette mine d'altitude.

4.2.3. Géologie et minéralisation

Les travaux miniers comprennent six niveaux, étagés de la cote 2503 (niveau 0), à la cote 2594 (niveau 5), la sortie du minerai se faisant par le niveau 3, prolongé à l'extérieur par un petit roulage de 25 mètres. Le minerai était ensuite descendu à la laverie du Bocard par un téléphérique.

Un "travers-bancs des Anglais" devait reconnaître l'extension de la minéralisation en aval des chantiers d'extraction, mais il n'a pas été ouvert assez loin pour atteindre les zones minéralisées. Des recherches avaient été faites sur le versant ouest vers l'indice d'Artignan mentionné ci-dessus, entre les cotes 2570 et 2680.

La minéralisation est essentiellement composée de blende, de couleur très sombre, de la variété marmatite noire, qui est une blende très ferrifère (S. N. Visvanath 1957 ; Y. Vernhet 1981), à laquelle est associée une forte proportion de pyrrhotine, de la pyrite et de la magnétite. De la galène y est parfois associée, en petites veines ou petits amas dans la blende. Cette galène est argentifère, et on y a observé de la proustite et, dans d'autres minéraux, de l'electrum Au-Ag. La gangue est essentiellement du quartz fissuré, avec un peu de calcite et quelques grains de pyrite et de pyrrhotine.

Un cortège de nombreux minéraux microscopiques accessoires associés à la minéralisation est énuméré par ces auteurs puis par Cl. Laforêt et coll. (1983). La paragenèse particulièrement importante comprend globalement les mêmes espèces que celle de Sentein et notamment la fameuse brunogéierite (oxyde de germanium), du bismuth, et l'association désormais classique du modèle Bentaillou qui comprend outre le germanium un peu de magnétite et de cassitérite, ces sulfures et sulfoarseniures de cobalt et nickel (breithauptite, cobaltite, gersdorffite, pentlandite, ullmannite). Ainsi la mine de Bulard fournit une parfaite illustration de la signature géochimique très originale de ce type de minéralisation dans les Pyrénées.

Le minerai est contenu dans un filon orienté approximativement Est Ouest, incliné à 45° près de la surface, et devenant sub-vertical en profondeur (J.-P. Destombes & P. Sainfeld, 1956). Sa puissance varie de 2 à 4 mètres, et atteint 10 mètres au niveau 2, où il se dédouble. V. Lebédeff (1943) assure qu'il est possible de le suivre en affleurements sur 500 mètres, encaissé dans les "schistes supérieurs".

D'après les archives de la mine, citées par Y. Vermhet, le gisement se compose de deux filons de 2 à 4 mètres de puissance, bien orientés ESE - WNW, à pendage de 45° à l'affleurement et allant jusqu'à la verticale. Le remplissage est composé de quartz, calcite, blende et galène, dans un ensemble de schistes.

Il restait peut être un peu de minerai dans la mine de Bulard au moment de sa fermeture en 1919, mais à des teneurs trop faibles compte tenu des conditions d'exploitation. On s'est demandé à plusieurs reprises s'il ne pouvait exister des extensions à découvrir. J.-P. Destombes et P. Sainfeld ont clairement posé le problème et y ont répondu. Il aurait fallu prolonger le « travers-banc des Anglais » sur au moins 300 mètres, et faire un ou deux sondages de reconnaissance des calcaires dans la même zone. Ils ont jugé ces travaux beaucoup trop lourds pour un résultat hypothétique.

4.2.4. Interprétation du gisement de Bulard

D'après V. Lebédeff (1943), "la cassure paraît suivre les plans de schistosité, ici à peu près W-NW". X de Gramont (1966) y reconnaît un filon, dans les phyllades entre le calcaire de Bentaillou et les schistes graphiteux du Gothlandien. Il est particulièrement développé à ce contact, comme ce cas a déjà été observé par ailleurs.

J.-P. Destombes et P. Sainfeld (1956), retrouvent dans ce secteur la série lithostratigraphique de Bentaillou, tout en reconnaissant que Bulard se trouve à un niveau stratigraphique plus élevé. Ils y identifient aussi un niveau de conglomérat à éléments calcaires montrant qu'il y a eu une ou plusieurs phases d'érosion postérieures au dépôt du calcaire et avant le dépôt des phyllades supérieurs.

Tout en écrivant que Bulard présente les caractéristiques d'un filon, D. Fert (1976) émet un doute en reconnaissant que "le problème géologique posé par le gisement de Bulard n'est pas classé", à cause d'observations dans des gisements voisins.

Y. Vernhet justifie aussi son attribution du gisement de Bulard à "l'horizon de Crabère", c'est à dire à la partie supérieure de l'Ordovicien, par plusieurs observations. Cependant, il conteste la nature filonienne du gisement. Pour lui, il s'agit d'une minéralisation stratoïde, dont la forme actuelle résulte de la tectonique : superposition de deux épisodes de déformation souple, avec reconcentration mécanique de la blende dans les charnières des plis, avec des recristallisations.

G. Pouit également (1985) range Bulard dans les minéralisations contenues dans "l'Unité supérieure III", c'est à dire l'Ordovicien terminal, au-dessus du calcaire de Bentaillou. Il pense qu'il doit bien s'agir d'un filon, comme décrit depuis longtemps. Les difficultés d'accès à la mine l'empêchent de faire de nouvelles observations qui seraient nécessaires pour étayer les interprétations différentes qui ont été tentées, comme celles d'un gîte stratiforme.

5. Conclusions et opportunités d'études complémentaires

(on se bornera ici aux perspectives d'études dans le domaine des sciences de la Terre)

Quand on évoque les mines de Sentein, on pense presque uniquement à la mine de zinc et plomb de Bentaillou, accessoirement à la mine de Bulard. Cette dernière, située à plus de 2500 mètres d'altitude, correspond à un filon qui a été épuisé, pour des teneurs correspondant à des conditions socio-économiques moins contraignantes qu'actuellement. Son contexte géologique laisse peu d'espoir d'y découvrir de nouvelles réserves exploitables dans des conditions d'accès et de travail aussi difficiles. Le peu d'intérêt qu'elle suscite encore est d'ordre géologique, dans le cas d'une reprise pour la recherche d'autres gisements analogues.

Au plan industriel deux questions majeures pouvaient être posées à propos de la mine de Bentaillou :

- le gisement qui a été exploité recèle-t-il encore une quantité de minerai suffisante pour justifier un jour une reprise de l'exploitation ?
- peut-on encore espérer découvrir des réserves économiques, soit dans des extensions du gisement connu, soit à partir des indices connus dans le voisinage immédiat, et qui pourraient être exploitées conjointement en utilisant les mêmes infrastructures ?

Pour répondre à la première question, plusieurs auteurs signalent que du minerai a en effet été laissé sur place, mais il semble qu'ils se soient davantage reposés sur les affirmations des auteurs précédents que sur des constatations de faits. Dans le meilleur des cas, l'évaluation la plus optimiste serait de 650 000 t à 10 % Zn+Pb auxquels s'ajouteraient 200 000 tonnes de minerai plus pauvre, ce qui n'a jamais été suffisant pour justifier la reprise de l'exploitation.

La réponse à la seconde question est aussi négative : le minerai reconnu dans les zones de Nord-Bentaillou et Rouge a une teneur trop faible et se présente en niveaux trop minces pour donner lieu à une exploitation rentable. Les chiffres des réserves sont très variables en fonction de la teneur de coupure retenue. Ils deviennent irréalistes si l'on garde une teneur limite trop basse pour le minerai.

De plus, l'étude géologique laisse peu d'espoir de découvrir de nouvelles zones minéralisées dans l'emprise de la mine, la raison essentielle étant l'amincissement ou la disparition du calcaire de Bentaillou.

Il faudrait donc reprendre la prospection du contact supérieur de ce calcaire dans les secteurs où il a été identifié, ou même rechercher s'il existe d'autres lentilles calcaires équivalentes. Ce type de recherche plus amont demande un investissement très lourd pour un résultat assez hypothétique.

Le contexte économique et géopolitique actuel n'est pas favorable à une telle entreprise. Mais le passé récent a montré qu'il peut changer rapidement. Sentein reste dans cette perspective un district très prometteur.

Cette éventualité néanmoins assez lointaine ne doit pas entrer en ligne de compte dans l'examen des projets de recherche archéologique et de valorisation touristique en cours. Des exemples comme la mine de mercure d'Almaden en Espagne montrent que l'activité extractive, quand elle revient s'installer dans une mine auparavant fermée, peut être menée sans nuisance pour l'activité patrimoniale développée entretemps, et même qu'elle peut en être un précieux adjuvant en déclenchant des synergies non seulement financières mais aussi logistiques, scientifiques et humaines, et en recréant, dans le site minier un moment inactif et voué à l'exode rural de la jeunesse, le lien sociologique et historique précieux qui unit les mineurs aux autres habitants et à leur terroir commun.

Au plan scientifique en tout cas, le gisement de Sentein a survécu largement à l'arrêt de la mine car il est aujourd'hui reconnu comme un gisement d'exception dans les milieux de la métallogénie ouest-européenne. Le district est en effet à l'origine du modèle « Bentailou » : un type exemplaire de minéralisations d'origine volcano-sédimentaire, comparable à celles qui se développent actuellement dans les rides médio-océaniques et dans la Mer Rouge, et qui contribue de façon considérable à la production mondiale des métaux de base, par exemple avec les mines énormes d'Australie, du Canada, de l'Alaska et du Rajasthan.

Au plan minéralogique les souterrains abandonnés de Sentein et Bulard n'ont livré jusqu'à présent aucune espèce minérale précieuse ni cristallisation spectaculaire qui désignent leurs piliers amincis et fragiles à la convoitise des collectionneurs. En revanche on y a trouvé une association de minéraux microscopiques particulièrement originale et notamment un composé de germanium (la brugiérite) qui contribuent de leur côté aussi au renom international du district auprès des spécialistes des sciences de la Terre.

Il serait intéressant de doser plus précisément que cela n'a été fait le germanium et éventuellement le gallium, dans le tout-venant. Une autre voie intéressante est la recherche de minéraux supergènes de germanium et de gallium, et notamment de composés supergènes complexes de germanium, nickel, cobalt, arsenic, antimoine, étain et/ou fer parmi les efflorescences d'oxydes, carbonates, sulfates, arseniates etc. qui ont pu se développer sur les parois des galeries ou en surface. Cette voie de recherche scientifique qui ne nécessite au départ que la binoculaire et du temps a déjà donné ailleurs (Cap Garonne, Daluis etc.) des résultats spectaculaires en permettant la découverte de nouvelles espèces minérales jusqu'ici inconnues au monde.

Bibliographie

DOCUMENTS EDITES OU POUR LE MOINS PUBLICS

Accessibilité et localisation

Les ouvrages cités sont disponibles, pour l'essentiel, à la bibliothèque centrale du B.R.G.M. à Orléans, et en général dans les bibliothèques publiques spécialisées dans les sciences de la Terre notamment à Paris. Les thèses de doctorat de Géologie sont déposées systématiquement au Service des Thèses du rectorat et à la bibliothèque des sciences de la Terre de l'université de soutenance. En général, un exemplaire est également déposé par l'auteur, pour sécurité, à la Bibliothèque Centrale du BRGM et parfois à celle de la Société Géologique de France 77 rue Claude Bernard à Paris (5°). Ces deux bibliothèques n'étant pas des bibliothèques publiques elles n'autorisent que la consultation sur place ou l'envoi de reproductions à prix coûtant.

Pour certains documents, marqués "A.D." dans la liste, nous avons consulté un exemplaire qui est la propriété personnelle de M. Alain Dommaget, géologue minier du Service "Ressources Minérales" du B.R.G.M. qui est spécialiste de cette région des Pyrénées. Ils ne sont cependant pas en exemplaire unique ou confidentiels, et, bien que de tirage réduit, il doit en exister d'autres exemplaires disponibles en bibliothèque spécialisée ou même en vente chez l'éditeur.

Liste par ordre alphabétique d'auteur

- Ané J. (1975) - Les roches, les minerais, les sources minérales et leur exploitation, édité par l'Office du tourisme du Biros. (A.D.)
- Aye F., Oudin E., Pouit G. (1981) – Les minéralisations sulfurées du Paléozoïque de Bretagne et des Pyrénées (contrat DGRST n° 79.7.1310). Rapport BRGM n° 81 SGN 767 GMX.
- Barnolas A., Chiron J.-Cl. (1996) – Synthèse géologique et géophysique des Pyrénées. Volume 1 : introduction ; géophysique ; cycle hercynien. Editions BRGM-ITGE, 2 vol.
- Bertrand L. (1907) - Contribution à l'histoire stratigraphique et tectonique des Pyrénées orientales et centrales. Bull. Serv. Carte géol. Fr., Paris, t. XVII, n° 118, p. 365-547.

- Bertrand L. (1940) - Sur la structure géologique du versant nord des Pyrénées. Bull. Serv. Carte géol. Fr., Paris, t. XLII, n° 204, p. 205-283.
- Béziat P., Bornuat M. (1994) - Carte minière de la France métropolitaine à 1/1 000 000. Ed. BRGM, une carte 116 x 106 cm et sa notice explicative, 102 p.
- Boissonnas J. (1972) - Carte géologique de la France au 1/50 000, coupure Pic de Maubermé. Publication du BRGM.
- Burguière Ph., Roques G. (1996) - Deux siècles d'histoire de la vallée du Biros, 1789-1995, 2^e éd., Editions de l'Office de tourisme du Biros. (A.D.)
- Chambolle P. (1972) - Notice de la carte géologique de la France à 1/50 000 feuille Pic de Maubermé, chapitre Substances minérales p. 17-21.
- Charruau D. (1974) - Relations entre les concentrations plombo-zincifères et la tectonique superposée du district de Hoque-Rabe Saube Carboire (Pyrénées ariégeoises). Thèse 3^e cycle, Géologie appliquée, Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- Destombes J.-P. (1958) - Sur un mode tectonique particulier des formations ordoviciennes de la mine de Bentailiou. Bull. Soc. Géol. Fr. (6) t. 8, n° 2, p. 105-112.
- Donnot M. (1974) - Attribution au Siluro-dévonien des schistes de Bencarrech-Sentein (Ariège) : ses conséquences pour l'extension de l'Ordovicien dans les Pyrénées. Bull. BRGM (2), II, n° 1.
- Durand J., Raguin E. (1943) - Sur la structure du massif du Maubermé dans les Pyrénées arégeoises. Bull. Soc. Géol. Fr. (5), t. 13, p. 9 - 19.
- Fert D. (1976) - Un aspect de la métallogénie du zinc et du plomb dans l'Ordovicien des Pyrénées centrales : le district de Sentein (Ariège, Haute Garonne). Thèse 3^e cycle, Géologie appliquée, Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- Florenti H. (non daté) - Article dans "l'Ariègeois Magazine", n° 141, p. 56-57.
- Gol D. (1998) - La tétraédrite d'Irazein (Ariège, France). Le Règne Minéral, n° 23, p. 15-24 [ne fait qu'évoquer Sentein et Bulard].
- Gramont X. de (1966) - Contrôle lithologique des minéralisations du massif de Maubermé (Ariège et Val d'Aran). Bull. Soc. Hist. Nat. Toulouse, t. 102, fasc. 2-3, p. 453-456.

- Guérin P. (1979) - Les minéralisations zincifères de l'Ordovicien de la région de Liat (Val d'Aran, Province de Lérida, Espagne). Thèse 3^e cycle, Géologie appliquée, Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- Kremer M. (1961) - Etude géologique et métallogénique de la région de Saint Bât (Haute Garonne). Thèse 3^e cycle, Géologie appliquée, Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- Laforêt Cl., Monchoux P., Oudin E., Tollon F. (1983) – Inventaire minéralogique de la France, n° 11 : département 09 – Ariège, tome 1 - bassin versant du Salat. Editions du BRGM, Collection R. Pierrot, p. 74-81 et 158-165.
- Levy C., Prouhet J. (1960) - Géothermométrie du gisement plombo-zincifère de Sentein (France). International Geological Congress, XXI session, Norden 1960, part XVI, p. 200-208.
- Marcoux E. (1986) - Isotopes du plomb et paragenèses métalliques traceurs de l'histoire des gîtes minéraux. Documents du BRGM, n° 117, p. 85-89.
- Napo F. (1968) – Articles Sentein. "La Dépêche", journal quotidien, numéros des 30 et 31 octobre, et du 2 novembre 1968.
- Oudin E. (1979) – Les minéralisations polymétalliques du Paléozoïque volcano-sédimentaire des Pyrénées centrales. C. R. d'action concertée D.G.R.S.T. Valorisation des Ressources du Sous-Sol, éd. BRGM, 128 p. Annexe III (1982), Minéralogie des pyrénées centrales. 29 p.
- Oudin E. (1981) – Etude minéralogique et géochimique des dépôts sulfurés sous-marins actuels de la ride Est-Pacifique (21° N). Documents du BRGM, n° 25, 241 p. (boulangérite de Bentaillou).
- Oudin E., Pouit G., Tollon F. (1985) – Minéralogie et zonalité des minéralisations de Pb-Zn dans la zone axiale des Pyrénées. Bull. Soc. Fr. Minéralogie.
- Pouit G. (1978) - Différents modèles de minéralisations "hydrothermale sédimentaire" à Zn (Pb) du Paléozoïque des Pyrénées centrales. Mineral. Deposita (Berl.), p. 411-421.
- Pouit G., Alsac Cl. (1978) – Les faciès noirs tuffacés du Dévonien et de l'Ordovicien des Pyrénées centrales et leurs minéralisations Zn (Pb). C. R. Acad. Sci., Paris, t. 287, série D, p. 415-418.
- Pouit G., Bouquet Ch., Bois J-P. (1979) - Les principaux niveaux minéralisés (Zn, Pb, Cu, Ba) du Paléozoïque des Pyrénées centrales : éléments de synthèse. Bull. BRGM, 2^e série, Section II, n°1, p. 23-34.

- Pouit G. (1986) - Les minéralisations Zn-Pb exhalatives sédimentaires de Bentaillou et de l'anticlinorium paléozoïque de Bosost (Pyrénées ariégeoises, France). Chron. Rech. Min., n° 485, 1986, p. 3-16.
- Pulou R. (1981) - Une mine de haute montagne : Sentein en Ariège. Lithos, Ed. Serre, Nice. 1981, n°5, p. 23-30.
- Raguin E. (1944) - Sur les intercalations calcaires du Silurien des Pyrénées. C.R. somm. Soc. Géol. de France, Paris, n° 6, p. 63-64.
- Sitter (De) L. U., Zwart H.-J. (1950) - Le calcaire de Bentaillou dans les Pyrénées ariégeoises. C. R. somm. Soc. Géol. Fr., n° 13, p. 229-231.
- Stolojan N., Viland J.-C. (1991) - Les gisements de plomb-zinc en France, situation en 1991. Rapport BRGM pour le Comité de l'Inventaire des Ressources Minières Métropolitaines, Ministère de l'industrie et de l'aménagement du territoire.
- Vernhet Y. (1981) - Les minéralisations zincifères de l'Ordovicien et du Dévonien du Val d'Orle (district de Sentein, Ariège), et de la région de Fourcaye (Val d'Aran, Espagne). Thèse Doct. Spéc. (3^e cycle) Géologie appliquée, Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- Vernhet-Charron (Bl.) - 1982 - Contribution à l'étude géochimique et minéralogique du Paléozoïque du Val d'Orle (district de Sentein, Ariège). Thèse Doct. Spéc. (3^e cycle) Géol. appl., Univ. Pierre et Marie Curie, Paris.
- Visvanath S.N. (1957) - Etude géologique de la région minière de Sentein (Pyrénées ariégeoises). Thèse Université Nancy (1955) ; Annales ENSG. Univ. Nancy, t.V. n° 2-3, p. 137-244.

RAPPORTS ET ARCHIVES MINIERES NON PUBLIEES

Accessibilité et localisation

Cette liste concerne des rapports miniers internes au BRGM ou à d'autres organismes, et non publiés. Pour ce qui est des rapports émis par le BRGM, un exemplaire est conservé systématiquement à la Bibliothèque Centrale du BRGM à Orléans. Pour quelques-uns émis par le BRGM mais de tirage moins officiel (ayant plus un caractère de « note administrative » que de « rapport »), et pour les rapports issus d'organismes autres que le BRGM, l'exemplaire que nous avons consulté a été retrouvé parmi les archives de l'ancienne Direction des Recherches Minières Métropolitaines et France-Europe qui sont conservées actuellement au Service "Ressources Minérales" du B.R.G.M. Ils ne sont normalement pas accessibles au public, car la plupart d'entre eux étaient confidentiels au moins au moment où ils ont été rédigés, et on ne peut les laisser consulter qu'avec l'accord écrit de l'organisme émetteur. Enfin, la lecture de certains

ouvrages cités dans la liste comme marqués "service des archives" suppose une demande de consultation écrite, même pour les agents du B.R.G.M.

Les archives du Service Ressources Minérales comportent également une importante correspondance des années 1953 à 1975 entre les différentes sociétés intervenantes (S.F.M.S., U.M.P., B.R.G.G.M. devenu B.R.G.M. depuis 1959. etc...) et les administrations, des notes diverses et rapports de visite. Certains de ces documents sont intéressants. Ils ont été pris en compte, mais ils peuvent difficilement figurer dans une bibliographie.

Les archives de l'ancienne Division Minière sud ouest du B.R.G.M. conservées au Service Géologique Régional de Toulouse et les archives du Service des Mines à Toulouse ne semblent pas contenir de document supplémentaire d'incidence notable pour l'objet de la présente étude.

Les demires actifs de la Compagnie Royale Asturienne des Mines concernant la France et donc les archives correspondantes (sauf destruction partielle ou dépôt aux Archives Nationales ?) ont été transférés à la société Denain-Anzin-Minéraux (DAM) filiale de La Continentale d'Entreprises (Groupe Nord-Est) dont le siège est à Paris (8°) 4 avenue Vélasquez (fax 01 53 96 00 24).

Il serait peut-être possible de trouver d'autres rapports à caractère minier ou d'autres documents administratifs dans les archives municipales ou départementales. Ces dernières recherches demanderaient un déplacement de plusieurs jours avec peu de chances d'aboutir à des découvertes réellement instructives. Les archéologues miniers spécialisés sur Sentein les ont en principe déjà dépouillées.

Documents listés suivant leur ordre chronologique de parution

Lebédeff V. (1943 ?) - Concession de Sentein et ses environs. Mines de Bentaillou, de Bulard, d'Uls, etc...Rapport BRGM n° I-23 (exemplaire non daté).

Balcon J. (1953) - Notes géologiques sur la mine de Sentein (Union Minière des Pyrénées). Rapport non numéroté, Compagnie Royale Asturienne des Mines, 28 septembre 1953.

Lougnon J. (1954) - Note sur le gisement de zinc et de plomb de la concession de Sentein et de Saint-Lary (Ariège). Rapport B.R.G.G.M. n° A 664, 8 juillet 1954.

Destombes J.-P., Lougnon J., Prouhet J.-P. (1955) - Etude géologique de la mine de Bentaillou-Rouge à Sentein (Ariège) et projets de recherches. Rapport B.R.G.G.M. n° A 818, 15 juin 1955.

- Dufranc J. (1955) - Commentaires sur les études et projets B.R.G.G.M. concernant le problème des recherches à Sentein (Ariège). Rapport B.R.G.G.M. n° A 818, 16 juin 1955.
- Anonyme (1955) - Convention B.R.G.G.M. - Union Minière des Pyrénées (U.M.P.) - Société Française des Mines de Sentein (S.F.M.S.), signée le 23 novembre 1955.
- Prouhet J.-P. (1956) - Mine de Sentein, deuxième tranche de travaux. Rapport B.R.G.G.M. n° A 907, 13 janvier 1956.
- Prouhet J.-P. (1956) - Etat des travaux de recherches à Sentein (Ariège) au 1er septembre 1956. Rapport B.R.G.G.M. n° A 1075, 1^{er} novembre 1956.
- Destombes J.-P. et Sainfeld P. (1956) - Etude géologique de la région du Pic de Bulard (Ariège). Rapport B.R.G.G.M. n° A 1064, 20 novembre 1956.
- Prouhet J.-P. (1957) - Programme des travaux à Sentein. 3^o tranche. Rapport B.R.G.G.M. n° A 1113, 10 mars 1957.
- Prouhet J.-P. (1957) - Etude de la zone Nord-Ouest Bentaillou (Mine de Sentein, Ariège). Rapport B.R.G.G.M. n° A 1133, 30 mars 1957.
- Balcon J. et Prouhet J.-P. (1957) - Etude des minéralisations résiduelles dans l'emprise des exploitations de Bentaillou. Rapport non numéroté, Union Minière des Pyrénées, 7 juin 1957.
- Prouhet J.-P. (1958) - Note sur la zone nord Bentaillou (mine de Sentein - Ariège). Rapport B.R.G.G.M. n° A 1271, 28 janvier 1958.
- Prouhet J.-P. (1958) - Note sur les recherches à Sentein. Rapport B.R.G.G.M. n° R 8003, 3 novembre 1958.
- Pouit G. (1974) - Les minéralisations Zn - Pb dans l'Ordovicien des Pyrénées centrales, étude préliminaire. Rapport B.R.G.G.M. confidentiel, n° 74 SGN 122 MET, mars 1974.
- Prouhet J.P. (1975) - Le gîte de Sentein (Ariège). Note BRGM non numérotée, 10 janvier 1975.
- Bertraneu J. (1975) - Note sur le gisement de Sentein (Ariège). Note BRGM sans numéro, 3 octobre 1975.

**DOCUMENTS CONSERVES AU SERVICE CENTRAL DES ARCHIVES DU
BRGM A ORLEANS**

(Notes et articles non publiés ; consultation sur demande).

Boubée de Gramont X. (février 1963) - Notes géologiques sur la mine de Sentein (Ariège) ; estimation des réserves des gisements de la concession de Sentein. Rapport n° 63-G-2)

Boubée de Gramont X. (mars 1963) - La concession de Sentein (Ariège). Etude générale et programme des travaux. Rapport n° 656.

Société Française des Mines de Sentein (mars 1963) – Rapport inédit.

**RAPPORTS INTERNES INTERMEDIAIRES ET NOTES AYANT PEU
D'INCIDENCE SUR L'OBJECTIF DE LA PRESENTE ETUDE, OU DONT LES
RESULTATS ONT ETE REPRIS DANS D'AUTRES RAPPORTS CITES
PRECEDEMMENT**

(suivant l'ordre chronologique de parution)

Prouhet J.-P. (1955) - Mine de Sentein (Ariège). Programme de travaux. Rapport B.R.G.G.M. n° A 827, 5 juillet 1955.

Destombes J.-P. et Sainfeld P. (1957) - Note sur la région frontière située au Sud de la concession de Sentein (Ariège). Rapport B.R.G.G.M. n° A 1099, mars 1957.

Prouhet J.-P. (1957) - Observations sur l'extension du calcaire de Bentaillou à l'Ouest du gisement de Bentaillou. Rapport B.R.G.G.M. n° A 1195, 1^{er} août 1957.

Guiraudie Ch., Prouhet J.-P., Passaqui B., Lorang M. (1961) - Campagne de prospection 1960 sur les calcaires Caradoc de l'Ariège. Rapport B.R.G.M. n° A 1760, 20 février 1961.

Carly R. (1969) – Schistes de Sentein (Ariège) : essais d'extraction chimique du vanadium. Rapport BGRM n° 69 RME 046 VDM, septembre 1969.

Pouit G. (1985) - Les minéralisations Zn (Pb) Ba du Paléozoïque des Pyrénées centrales : une mise au point et un compte rendu des missions 1984. Rapport BRGM n° 85 DAM 037 GMX.

Dommanget A. (1999) - Les gisements de plomb et de zinc de Saube et Hoque-Rabe.
Mémoire inédit pour la municipalité de Couflens-Salau. (A.D.)

Annexe 1 - Analyse de documents référencés

Dans cette partie, il est présenté une analyse du contenu de quelques ouvrages les plus importants concernant la géologie des mines de Sentein et de la région, de l'histoire de leur exploitation et de leur influence socio-économique.

Ils ont été retenus parmi la liste bibliographique pour leur contenu significatif, indépendamment de leur longueur.

Les documents sont listés ci-dessous suivant l'ordre alphabétique des auteurs.

Ané J. (1975) - Les roches, les minerais, les sources minérales et leur exploitation. 55 p .

Petit ouvrage de vulgarisation scientifique au sujet de la géologie de la région du Biros, il explique l'influence prépondérante des différentes applications de cette discipline sur le développement économique.

Ce petit livre a été écrit par un homme du pays et qui y a toujours vécu. Ingénieur à la retraite, il avait passé toute sa vie au service de l'industrie minière et tous les hommes de sa famille ont travaillé à la laverie de minerai du Bocard.

Jean Ané commence la première partie de son livre par une évocation de la géologie de la région. Il replace son histoire dans l'édification des Pyrénées, fait une description stratigraphique et lithologique des roches rencontrées. Il s'exprime toujours en termes simples et accessibles à tous, en expliquant la plupart des termes scientifiques par des notes infrapaginales. De la même manière, il décrit succinctement les fossiles qui, trouvés dans les roches sédimentaires de la région, intéressent les naturalistes et permettent aux géologues de dater les séries stratigraphiques.

L'auteur en vient aux premières applications économiques de la géologie. L'exploitation des roches est abordée par les pierres de construction, les ardoisières, et la carrière de marbre de Balacet. Pour cette dernière, il explique la méthode d'exploitation, et l'art de débiter les blocs de marbre.

La seconde partie est consacrée aux minerais du Biros et à leur exploitation. J. Ané cite les deux paragenèses minéralogiques observables et donne une description rapide des principaux minerais trouvés dans la région.

Après avoir évoqué les exploitations depuis l'antiquité, il retrace un historique rapide des mines de l'époque moderne qui commence pour lui au début du 20^e siècle. Ce sont

en premier lieu les exploitations de Bulard et de Bentaillou dont les minerais de zinc et de plomb étaient traités au Bocard, les exploitations espagnoles voisines (Orle, Port d'Urets, Pic de l'Homme), et la mine de cuivre d'Irazein près de Bonac.

J. Ané consacre ensuite un petit chapitre à l'enrichissement des minerais, illustré de deux schémas explicatifs de leur traitement : lavage et flottation. Il en arrive à citer les métaux extraits de ces minerais et leurs principales utilisations, par ordre alphabétique : argent, cadmium, cuivre, plomb et zinc.

Il explique enfin la pénibilité des conditions d'exploitation au fond de la mine et leurs conséquences sur la santé des mineurs. Il évoque pourtant une période d'activité bienfaitrice pour le commerce local sans s'étendre réellement sur le rôle économique des mines.

Une troisième partie assez courte est consacrée à la source thermale du Pradeau.

L'ouvrage se termine par une petite liste de références bibliographiques et une carte schématique de facture artisanale de la région du Biros.

Le livre de J. Ané n'a pas une grande valeur scientifique, mais il a le mérite d'être abondamment illustré de photographies pour la plupart anciennes, et d'être facilement compréhensible pour les non professionnels.

Balcon J. (1953) - Notes géologiques sur la mine de Sentein. Rapport Compagnie Royale Asturienne des Mines. 21 p. + 3 p. d'annexes.

Ce rapport a été écrit juste après l'arrêt de la production de la mine de Bentaillou. L'idée essentielle de l'époque était que cet arrêt était dû à une baisse des cours des métaux, ce qui augmentait les teneurs limites ("teneurs de coupure") pour la rentabilité du minerai, mais par conséquence diminuait les réserves exploitables à Bentaillou.

Dans un tel contexte, la survie de la mine dépendait uniquement de la mise en évidence de nouvelles réserves qui puissent être exploitées à un coût compatible avec le cours des minerais.

Le premier chapitre du rapport concerne la géologie générale. La description stratigraphique est inspirée du rapport de Victor Lebedeff (1943). Le paragraphe tectonique, assez détaillé, s'appuie surtout sur des observations faites dans la mine de Bentaillou. Il décrit bien l'effet des failles sur la minéralisation pour chaque quartier de la mine.

Le paragraphe sur la minéralisation distingue bien les deux niveaux, supérieur et inférieur, qui peuvent parfois se rejoindre.

Le second chapitre passe en revue les extensions possibles de la minéralisation dans l'emprise des travaux existants. Joseph Balcon distingue trois types d'extensions qu'il doit être possible de trouver rapidement :

- des extensions latérales des zones abandonnées prématurément, dans l'horizon supérieur du minerai et plus souvent dans l'horizon inférieur,
- des extensions vers l'aval des minéralisations exploitées,
- des extensions verticales, au pied des chantiers où l'horizon inférieur a été laissé.

Dans cette optique, l'auteur fait un inventaire de tous les chantiers d'exploitation, avec une évaluation pour la plupart d'entre eux.

Dès le début du troisième chapitre, J. Balcon admet que tous les restes de la minéralisation reconnue sont bien insuffisants en quantité comme en qualité pour une reprise d'activité.

Il envisage un programme de recherches en deux phases pour rechercher de nouvelles minéralisations en aval des travaux existants.

Il propose d'explorer ainsi une zone de 900 mètres de long sur 100 mètres de large, qui pourrait apporter une réserve de l'ordre de 500 000 tonnes de minerai. Le programme comporte 28 sondages, pour une longueur totale d'environ 500 mètres. Son coût global est évalué globalement, sans analyse détaillée.

Ce rapport devait être accompagné de nombreuses illustrations hors-texte qui n'ont pas été trouvées dans les archives du BRGM. Les archives de la Cie Royale Asturienne des Mines pour la France ont en principe été récupérées par la société Denain Anzin Minéraux (DAM) quand celle-ci a repris les actifs de la CRAM, et sont de ce fait à rechercher au siège de DAM à Paris (cf. adresse p. 67).

Burguière Ph., Roques G. (1996) - Deux siècles d'histoire de la vallée du Biros. 244 p.

Véritable livre d'histoire de la région du Biros, racontant les deux derniers siècles au travers des différents aspects de la vie locale, où les mines de Sentein ont pris une très grande place.

C'est la seconde édition d'un ouvrage faisant partie d'une collection « contribution à la connaissance du Biros ». Il a été écrit par deux enfants du pays et un aspect affectif assez fort se ressent du début à la fin du livre.

Il retrace un peu plus de 200 ans de l'histoire de cette petite région reculée qui semble acculée tout contre la barrière pyrénéenne. Sur la totalité du livre, en effet, il y a assez peu d'évocations d'échanges avec l'Espagne toute proche, sinon que pour utiliser les pâturages espagnols, ou comme une terre d'asile du côté français, dernière opportunité pour ceux qui voulaient se réfugier ou se cacher.

C'est un véritable recueil qui raconte une multitude de petites histoires populaires, sociales, économiques, religieuses, industrielles, syndicales, administratives...

Pour raconter ces deux siècles de la vie de la région, les auteurs procèdent tout simplement par ordre chronologique, et leurs différents chapitres respectent les grandes coupures historiques, politiques ou économiques.

- **Chapitre 1** : état des lieux en 1789, juste avant la Révolution ; quelques considérations sur la vie sociale, les rapports entre les différentes classes sociales, noblesse, clergé, et classe paysanne.

- **Chapitre 2** : la Révolution, les années de troubles qui ont suivi, les débuts de la République, la nouvelle administration de la région. Un épisode très important pour le Biros a été la guerre contre l'Espagne en 1793, une rivalité qui est venue s'ajouter aux difficultés ressenties tout au long de la période napoléonienne.

- **Chapitre 3** : de 1815 à 1850, c'était le début d'une période de surpopulation qui causait des problèmes d'espace vital dans cette région où chaque commune voulait rester indépendante et où le pouvoir central ne faisait rien pour l'économie locale. Celle-ci restait exclusivement agraire et la place manquait pour les pâturages et les cultures.

- **Chapitre 4** : les auteurs racontent comment les premières mines de Bentailou ont ouvert en 1848, suivies par celle de Bulard à la fin du siècle, puis par d'autres dans le voisinage. Ils racontent en détails les problèmes rencontrés par les sociétés qui se sont succédées pour l'exploitation des mines jusqu'en 1914.

Ils expliquent comment cette nouvelle activité industrielle a transformé la région et ses habitants qui deviennent des mineurs paysans. En plus des installations pour l'exploitation minière, de nombreux équipements ont été créés (routes, fontaines, écoles, tramway, équipement électrique...). Les auteurs font remarquer que les mines n'ont apporté dans la région qu'une prospérité toute relative.

- **Chapitre 5** : il relate l'influence de chacune des deux guerres mondiales sur la vie et l'économie : la région a toujours été trop reculée et trop loin des zones d'enjeux militaires pour subir des dommages directs. Les guerres ont fait flamber le cours des métaux et ont considérablement accru la demande, mais la main d'oeuvre était rare, il était difficile d'entretenir le matériel. Le regain d'activité était artificiel, temporaire et ne suffisait pas à combler les dommages humains. La période d'entre deux guerres a vu une certaine prospérité de courte durée qui s'est achevée avec de graves conflits sociaux.

- **Chapitre 6** : les auteurs relatent le déclin rapide des mines après la seconde guerre mondiale, qui s'est terminée par leur fermeture définitive en 1953, malgré plusieurs tentatives de réouverture. Ils montrent comment l'économie locale a périclité, entraînant une baisse dramatique de la population.

Ils expliquent enfin que les seules alternatives qui ont remporté quelques succès tournent autour de formes variées du tourisme moderne, le plus souvent à vocation écologique. Ils montrent qu'une réorganisation des structures administratives concernées reste actuellement le seul espoir de la survie économique de la région.

Le livre est abondamment illustré de photographies récentes et anciennes, bon nombre d'entre elles étant des cartes postales, et de reproductions de documents anciens.

Des numéros dans le texte renvoient à une liste de notes à la fin de chaque chapitre. Ce peuvent être quelques références bibliographiques, ou des notes explicatives, mais ce sont pour la plupart des renvois à des documents d'archives administratives officielles, montrant le sérieux de la documentation utilisée.

Destombes J.-P., Lougnon J., Prouhet J.-P. (1955) - Etude géologique de la mine de Bentailou-Rouge à Sentein (Ariège) et projets de recherches. Rapport B.R.G.G.M., 89 p.

C'est à la fois une étude géologique, effectuée par J.-P. Destombes, un rapport de fin d'exploitation et un programme d'exploration minière, ces deux derniers rédigés par J. Lougnon et J.-P. Prouhet, et ceci correspondant aux trois parties de l'ouvrage.

La partie géologique commence par une étude assez complète de la formation de Bentailou. L'auteur s'appuie sur la description détaillée de quelques coupes géologiques passant à l'aplomb des travaux miniers ou à leur voisinage immédiat, en accordant une attention particulière au calcaire : sa position dans la série stratigraphique, ses variations d'épaisseur, son passage latéral aux autres formations de l'Ordovicien supérieur. Il décrit un endroit où le calcaire aurait subi un métamorphisme de contact, ce qui lui paraît révéler la proximité d'un granite intrusif caché.

Jean-Paul Destombes se livre ensuite à l'analyse de l'importance relative des familles de failles et de leur âge relatif, et à l'étude des observations tectoniques qu'il est possible de faire dans le travers-banc de Rouge alors nouvellement ouvert.

Pour terminer, il met en relation la minéralisation hercynienne avec les intrusions granitiques et la tectonique.

On trouve en annexe la description pétrographique de six échantillons faite par Eugène Raguin.

L'étude du gisement commence par la description et l'interprétation des failles visibles dans les travaux miniers, se poursuit par l'étude pétrographique du calcaire de Bentailou, des schistes qui se trouvent en dessous, au dessus, ou en passage latéral, et des faciès transformés par le métamorphisme, et décrit quelques coupes du calcaire et de son contact supérieur à l'intérieur de la mine.

Les auteurs en arrivent ensuite à la minéralisation, sa forme et ses dimensions, et décrivent plusieurs chantiers de la mine. Ils énumèrent les espèces minérales contenues dans le minerai pour conclure rapidement que Sentein est un gîte de substitution mésothermal, et donner enfin leurs conclusions concernant la mise en place de la minéralisation.

Dans la troisième partie, les auteurs exposent tout d'abord les buts des travaux de recherches programmés. L'exploitation ne semblant avoir atteint aucune limite définitive du gisement, il s'agit de vérifier que le contexte géologique (lithologie et structure) se poursuit favorablement et que la minéralisation connue se prolonge effectivement.

Les auteurs définissent alors les secteurs à retenir pour ces recherches, leur but précis et les méthodes à employer, avec leur analyse critique. Ils exposent ensuite leur programme détaillé, zone par zone, avec tableaux récapitulatifs, évaluation des dépenses et ordre d'exécution.

Ils concluent en annonçant que les résultats de ce qui n'est qu'un programme préliminaire serviront à définir le programme ultérieur dont ils annoncent les grandes lignes, davantage axées vers la minéralisation en elle-même.

Ce rapport est suivi d'une annexe très courte (3 pages) datée du lendemain (16/06/55), écrite par le chef géologue BRGM d'alors, J. Dufranc, et comportant des remarques critiques sur le programme des travaux de recherche.

L'ensemble est accompagné d'un grand nombre de cartes de situation, plans miniers, coupes géologiques observées et prévisionnelles, et de 10 photographies.

Fert D. (1976) - Un aspect de la métallogénie du zinc et du plomb dans l'Ordovicien des Pyrénées centrales : le district de Sentein (Ariège, Haute Garonne). Thèse 3^e cycle. 140 p.

Cette thèse de doctorat de troisième cycle s'inscrit dans l'ensemble des travaux d'une équipe du Laboratoire de Géologie Appliquée de l'Université de Paris VI, qui a étudié la géologie et la métallogénie de la partie centrale de la zone axiale des Pyrénées.

C'est une étude de la minéralisation en zinc et plomb de l'ancienne région minière de Sentein, présente essentiellement dans le calcaire ordovicien du Bentaillou, ce qui lui a valu le nom de « gisement du Bentaillou ».

L'auteur situe brièvement la région dans son cadre géographique et humain et la replace dans l'ensemble géologique pyrénéen.

La première partie de l'ouvrage est consacrée à la géologie générale de la région de Sentein, qui concerne les séries sédimentaires de l'Ordovicien, du Silurien et du Dévonien : Description des séries stratigraphiques visibles en affleurements sur le terrain, observations macroscopiques et microscopiques des roches, analyses minéralogiques, observation des structures, des failles, étude du métamorphisme

Une plus grande attention est réservée aux formations qui sont porteuses de minéralisations, en particulier le calcaire du Bentaillou, étudié en détails également sur les échantillons provenant de carottes de sondages. Ce calcaire constitue une lentille déposée à l'Ordovicien supérieur, sous une faible tranche d'eau, avec des apports détritiques fréquents.

A la lumière de ses observations personnelles et des travaux déjà publiés, l'auteur propose une interprétation de l'histoire géologique de la région.

D. Fert s'attache ensuite à l'étude de la minéralisation qui avait fait l'objet de plusieurs exploitations pour le zinc et le plomb dans la région. La mine principale, dite de Bentaillou-Rouge, a permis de nombreuses observations tout au long de ses 7 km de galeries étagées sur plusieurs niveaux entre les cotes 1550 et 1940, ainsi que dans les environs immédiats (Ste Amélie et Espeletta). L'auteur décrit la distribution, la forme et les dimensions des amas de minerai, la nature de cette minéralisation (minéraux de zinc et de plomb), les minéraux qui l'accompagnent, les roches qui viennent à son contact, etc.

Il montre que le minerai qui avait été exploité est composé essentiellement de blende, associée à de la galène. Cette minéralisation se place au toit du calcaire de Bentaillou, plus ou moins disséminée dans des shales noirs. Elle est plus concentrée dans certains niveaux siliceux ou dans des petites veines quartzieuses.

Il fait une description rapide des autres indices de la région géologiquement situés dans le calcaire de Bentaillou ou à son contact supérieur : Bularic ou Bulard-bas, Artignan, Chemin du Past, Albe, Araing, Pic Noir. Ils n'ont donné lieu qu'à des travaux de recherches sans véritable exploitation.

D. Fert en vient ensuite aux indices situés géologiquement plus haut, dans les quartzophyllades supérieurs. Il passe rapidement sur Portillon d'Albe et Uls, mais il s'arrête un peu sur Bulard, ancienne exploitation qu'il n'a pu visiter, et sur Crabère, un peu en dehors de la concession de Sentein, bien que ces gisements soient d'un type gîtologique différent.

Quelques pages sont consacrées à l'étude du minerai proprement dit : minéralogie, composition chimique et minéraux associés.

On arrive enfin au chapitre interprétatif sur la genèse du minerai, en le replaçant dans son contexte sédimentologique et structural. L'importance de la thèse consiste ici en la remise en cause des interprétations précédentes, en s'appuyant sur les travaux alors récents de la carte géologique au 1/50 000 "Pic de Maubermé". Il donne des arguments pour montrer l'origine précoce de la minéralisation dans le calcaire du Bentaillou.

En conclusion, D. Fert souligne que les effets de la tectonique ont compliqué l'exploitation du minerai. Il fait remarquer que la poursuite d'une exploitation économique ne pourrait être envisagée que dans le cadre de l'exploitation d'un ensemble de plusieurs gisements. Il n'écarte pas la possibilité de découvrir de nouveaux indices, ou des extensions de gîtes connus et suggère même quelques voies de recherche qui pourraient y conduire.

L'ouvrage se termine par cinq planches de quatre photographies macroscopiques et microscopiques du minerai, une liste de références bibliographiques, et une carte géologique hors-texte au 10 000^e sur fond topographique IGN.

Laforêt Cl., Monchoux P., Oudin E., Tollon F. (1983) – Inventaire minéralogique de la France : département de l'Ariège. Ed. BRGM, 192 p.

Cet ouvrage est un des derniers parus de la collection éditoriale des Inventaires minéralogiques départementaux de la France, supervisée par le grand minéralogiste du BRGM Roland Pierrot. C'est aussi l'un des volumes qui ont été consacrés aux départements les plus prestigieux de la France, et les plus riches en indices méritant d'être notés au plan minéralogique (ce qui justifia de scinder la publication en deux tomes). Une équipe rédactionnelle très importante a été réunie pour la circonstance.

Sa cheville ouvrière a été la minéralogiste Elisabeth Oudin, qui venait d'acquérir au CNRS une grande notoriété sur l'étude minéralogique des sulfures des rides médio-océaniques, et qui s'est alors spécialisée au BRGM d'une part sur l'étude au microscope des minerais pyrénéens (au point de devenir un expert de la métallographie des gîtes originaux de toute la chaîne) puis sur les amas sulfurés actuels de la Mer Rouge.

A la signature des quatre minéralogistes de grand renom qui sont les auteurs principaux se sont ajoutés les noms de spécialistes venus de disciplines et d'organismes très divers :

- François Pillard, Paul Picot, Georges Pouit, Anne-Marie Gallas, Jean-Pierre Prouhet, Jacques Bertraneu, Christian Bouquet, Yves-Pierre Calvet, André Gerbal, Paul Chambolle, Jean-Pierre Bois, Michel Chaput, Charles Guiraudie et André Michard

- du BRGM ; c'était de la sorte un hommage à toutes les découvertes de terrain ou de laboratoire dues aux agents du BRGM en Ariège depuis des décennies ;
- Xavier Boubée de Gramont, François Fontan et Célestine Baudracco (hommage à la longue contribution du Laboratoire de Minéralogie du CNRS et de l'Université de Toulouse) ;
 - Claude Dubois (alias Dubatik) ; Jean-Emmanuel Guilbaut de la Direction des Antiquités Historiques de Midi-Pyrénées et de la RCP 496 Mines et Fonderies du Monde Romain l'Université de Toulouse (qui apportaient tous deux à l'ouvrage la contribution et l'éclairage des archéologues miniers) ;
 - Michel-Roger Meyer, Gérard Ferre et Henti Tabarant.

Comme pour les autres albums de la collection éditoriale, l'ouvrage est principalement construit autour de fiches individuelles de gisement ou d'indice, où sont énumérés, pour chaque gîte, la situation géographique et l'accès, les noms, abondance, taille, caractéristiques de chaque espèce minérale présente et (en lexique) sa composition chimique, avec un croquis de situation à 1/50 000. Malgré les réticences usuelles du directeur de la collection, les auteurs ont usé de leur position scientifique pour que le chapitre d'introduction géologique et la bibliographie soient plus étoffés que d'habitude et l'ouvrage y gagne considérablement en caractère de monographie encyclopédique.

Malgré l'apparente monotonie de la minéralisation de Sentein-Bulard où, à l'oeil nu, les classiques sulfures de zinc (blende), plomb (galène), fer (pyrite et pyrrhotite) dominant, c'est au cours des études préparatoires au microscope métallographique qu'une immense surprise vint en la présence de minéraux extrêmement-, très- ou assez rares.

Au plan de curiosité mondiale, il faut citer un minéral extrêmement rare de germanium, la brunogéierite de composition Fe_2GeO_4 . Elle est présente en cristaux microscopiques dans la blende au sein de plusieurs gîtes des secteurs de Bentaillou et de Bulard, ainsi que dans plusieurs autres gîtes ariégeois de même type métallogénique (op. cité, page 176).

Parmi les curiosités (microscopiques) plus classiques puisqu'on en connaît en plusieurs gîtes des Pyrénées ou d'autres socles paléozoïques français, on trouva aussi à Bentaillou de l'or natif et à Bulard de l'électrum (alliage naturel d'or et d'argent) tandis que l'ensemble Bentaillou-Bulard présente une signature géochimique assez remarquable avec de nombreux arsenio-sulfures ou sulfo-antimoniures de cobalt, nickel (ullmannite etc.) à côté d'autres sulfo-antimoniures assez rares en France comme la ménéghinite. A Bulard, l'association minérale est complétée de façon encore originale par de la cassiterite (oxyde d'étain), du bismuth natif et de la proustite (sulfo-arseniure d'argent). La présence de ce dernier minéral quoique microscopique confirme avec la stéphanite (sulfoantimoniure d'argent) trouvée à Bentaillou la tradition selon laquelle de l'argent a pu être parfois exploité dans les deux mines, même à l'état de traces.

Lebédeff V. (non daté, cité comme datant de 1943) - Concession de Sentein et ses environs. Mines de Bentaillou, de Bulard, d'Uls, etc.. 36 p.

Ce rapport est le premier qui soit connu concernant la géologie de la région des mines de Sentein. Il a été écrit juste après la reprise d'activité de la mine du Bentaillou, au début de ce qui sera la dernière période de production.

Après une courte introduction géographique, l'auteur entreprend le chapitre "géologie" en contestant l'interprétation du calcaire de Bentaillou telle qu'elle est imposée par la carte géologique au 1/80 000 de l'époque. Il montre que la formation de Bentaillou est une lentille calcaire d'âge ordovicien, en position tout à fait normale dans la série qui forme un anticlinorium dont le secteur du Bentaillou est le flanc nord.

L'étude de la minéralisation commence à la page 6, avec la mine du Bentaillou. Lebédeff décrit les quartiers du gisement qui ont livré les plus grosses minéralisations, puis il passe en revue les principales failles, leur remplissage et leur effet sur la géométrie du gîte.

Il procède ensuite à l'inventaire des extensions possibles de la mine, en suivant le contact entre les calcaires et les schistes supérieurs, d'abord au niveau des travaux souterrains, puis en direction de l'Est. Il passe ensuite à la description du même type d'indices sur l'autre versant de la vallée supérieure du Lez : Pyramide de Serre et filon de la Hourquette, puis aux environs du Bocard.

L'auteur étudie ensuite la mine de Bulard : l'accès très difficile et la visibilité souvent médiocre expliquent les lacunes de la connaissance géologique. Il décrit le filon qui constitue le gisement et explique que malgré de bonnes teneurs, les difficultés liées à la situation ont imposé la fermeture en 1917. Il décrit ensuite les travaux de recherche voisins d'Artignac qui font partie du même gisement.

Il passe enfin aux indices de Crabère, beaucoup plus à l'Ouest du Bentaillou, puis aux mines d'Uls, au Nord-Ouest.

Dans ses conclusions, Lebédeff explique que le calcaire du Bentaillou forme une grosse lentille au sein de l'Ordovicien supérieur schisteux, et il interprète la mise en place du minerai, au contact supérieur du calcaire et vers les bords de la lentille. Il termine par quelques guides de recherches qui pourraient, selon lui, amener à la découverte de nouveaux amas dans la mine du Bentaillou, dans les environs immédiats de la mine de Bulard, et qui peuvent orienter des études métallogéniques aux alentours des autres indices de Crabère et Uls.

Le rapport est accompagné de 39 reproductions photographiques de coupes et plans souvent assez peu lisibles aujourd'hui.

Lougnon J (juillet 1954) - Note sur le gisement de zinc et de plomb de la concession de Sentein et Saint-Lary (Ariège). Rapport B.R.G.G.M., 38 p.

Il est nécessaire de replacer ce rapport dans l'ordre chronologique. Il a été écrit un an après l'arrêt de l'exploitation de la mine du Bentaillou, et un an également après le rapport de Lebédeff, qui était la première étude géologique du gisement. Le rapport de Jean Lougnon est son pendant à caractère plus minier. Il s'agissait alors d'envisager des recherches pour trouver au moins 500 000 tonnes de réserves de minerai supplémentaires.

J. Lougnon rapporte l'opinion de l'exploitant selon laquelle le gisement devrait receler des réserves au moins égales à la production totale passée. Il rappelle pourtant qu'il restait très peu de minerai à faible teneur au moment de l'arrêt de la production. L'avenir de la concession dépend donc d'un vaste programme de recherches qui n'a été qu'à peine ébauché à cette date. La présente note a pour objet de fixer les grandes lignes de ce programme et de les justifier. Elle a été rédigée d'après des archives du Service des Mines de Toulouse, un dossier de la Compagnie Royale Asturienne et des renseignements oraux du Directeur d'exploitation, sans étude personnelle de l'auteur.

L'auteur aborde l'étude géologique et arrive vite au calcaire de Bentaillou et à ses relations avec la minéralisation. Il le décrit déjà comme une lentille avec les minéralisations les plus importantes à sa périphérie. Bentaillou est situé sur la bordure nord, au contact de la partie supérieure avec les phyllades ordoviciens.

Il situe ensuite les parties les mieux minéralisées du gisement. Au vu des affleurements, des dernières galeries ouvertes et des idées de V. Lebédeff, il lui semble peu probable de trouver des amas minéralisés aussi riches que ceux qui ont été exploités. Il en arrive à l'origine de la minéralisation, pour lui "substitution du calcaire par de la blende", et à sa composition minéralogique.

J. Lougnon établit ensuite des comparaisons des rendements de différents quartiers de la mine, ce qui laisse supposer qu'il a pu trouver des chiffres de production dans les archives minières.

Il fait ensuite remarquer que les limites de l'exploitation sont souvent des failles, mais jamais des limites de minéralisation. Il lui semble nécessaire d'établir un programme de recherches rationnel et démontrer la présence de réserves suffisantes avant d'ouvrir de nouvelles galeries.

Les secteurs recommandés sont les prolongements aval de Bentaillou, au N et NW des failles qui les limitent actuellement, les reconnaissances devant se faire par sondages. Le

programme existant, déjà trop optimiste, paraît insuffisant pour envisager la réouverture de la mine. Il faudrait élaborer un nouveau programme atteignant une plus grande profondeur. Un ensemble de sondages devra orienter l'ouverture de nouvelles galeries qui sont elles indispensables pour des échantillonnages de bonne qualité.

J. Lougnon pense qu'il est encore possible de découvrir là du minerai assez riche, qui permettraient à l'exploitant, dans un même temps, de valoriser des zones à minerai moins riche, comme Rouge, mais "tout est encore à démontrer".

La note se termine par une étude rapide du gisement de Bulard. Il semble bien épuisé, mais sa situation, comme Bentaillou, en bordure de la lentille calcaire doit encourager des recherches qui ont été à peine effleurées à son contact supérieur.

Cette note est accompagnée d'une carte géologique schématique de la région au 1/50 000, d'une carte de la concession Bentaillou-Bulard, d'un plan de la mine du Bentaillou-Rouge au 1/1 000, de divers plans et coupes de travaux miniers, certains avec échantillonnages et teneurs, et d'une coupe de la mine de Bulard.

Pouit G. (1985) - Les minéralisations Zn (Pb) Ba du Paléozoïque des Pyrénées centrales : une mise au point et un compte rendu des missions 1984. Rapport BRGM n° 85 DAM 037 GMX. 40 p.

Ce rapport est une synthèse des travaux effectués sur le Paléozoïque des Pyrénées centrales depuis 1972, par les ingénieurs du B.R.G.M. et aussi à l'occasion de thèses de troisième cycle, en particulier par l'équipe du Laboratoire de Géologie Appliquée de l'Université de Paris VI, dans les domaines de la géologie et des minéralisations.

Cette mise au point s'appuie surtout sur des corrélations lithostratigraphiques pour définir les principaux niveaux porteurs minéralisés dans l'Ordovicien et le Dévonien inférieur et sur la paléogéographie et ses relations avec les modèles minéralisés.

L'étude porte sur plusieurs unités géologiques appelées "dômes" : Pierrefitte ; Marimana ; Bosost-Bentaillou ; Lys Caillaouas et autres. Retenons ici surtout la partie concernant le "dôme de Bosost-Bentaillou, détaillée pages 16 à 22.

G. Pouit commence par une description de la série lithostratigraphique, avec l'Ordovicien divisé en trois unités, constituant un vaste anticlinorium. Cette série est simple dans ses grandes lignes, mais plus complexe dans le détail et n'a jamais fait l'objet d'études complètes. Il montre que les dépôts de l'Ordovicien correspondent à une

paléogéographie particulière, en particulier pour les deux unités supérieures bien minéralisées. Il confirme les idées de C. Levy et J-P. Prouhet (1960) qui pensent que la morphologie du calcaire de Bentaillou évoque des dépôts de récifs.

Quand il en vient à l'étude des minéralisations, l'auteur distingue celles qui sont contenues dans l'unité II et celles contenues dans l'unité III.

Le premier type correspond à Bentaillou, et il en décrit les caractéristiques, en soulignant des particularités exceptionnelles d'ordre structural (présence de failles), paléogéographique (récif), et génétique (aspect hydrothermal). Le second type est assez important en Espagne mais ne correspond qu'à de petits indices du côté français, hormis la minéralisation du Mas de Bulard, située à un niveau différent de l'unité III.

G. Pouit donne ses conclusions sur ce secteur le mieux minéralisé des Pyrénées : Relation étroite entre paléogéographie et tectonique ; association de minéralisations concordantes et sécantes par rapport à la lithologie ; manifestations hydrothermales associée aux minerais. Ce sont les trois caractères fondamentaux des minéralisations hydrothermales sédimentaires. Selon lui, il semble difficile d'utiliser ces résultats pour de nouvelles recherches, les données cartographiques actuelles étant insuffisantes.

Dans ses conclusions générales, il reprend l'origine hydrothermale des minéralisations. Bien que dans la région de Sentein, on n'ait pas pu observer leur association spatiale avec des manifestations volcaniques, cela reste un sujet pour des études futures.

G. Pouit fait ressortir un nombre important de caractères communs aux minéralisations des Pyrénées centrales. Certains d'entre eux sont des contrôles tactiques importants qui peuvent en faire des guides de recherche stratégiques qu'il conviendrait d'étudier davantage, en particulier la paléogéographie.

Le rapport se termine par une longue liste de références bibliographiques et des tableaux des associations minéralogiques par secteurs et indices.

Pouit G. (1986) - Les minéralisations Zn-Pb exhalatives sédimentaires de Bentaillou et de l'anticlinorium paléozoïque de Bosost (Pyrénées ariégeoises, France). Chron. Rech. min., n° 485, pp. 3-16.

Cet article est le dernier de l'auteur concernant cette région des Pyrénées. C'est une étude géologique directement orientée vers l'interprétation des gisements du dôme de Bosost et plus particulièrement du gîte du Bentaillou (voir aussi p. 106 ci-après).

G. Pouit replace rapidement le gisement dans la structure géologique du dôme de Bosost et donne une description lithologique détaillée mais synthétique des séries de l'Ordovicien, du Silurien et du Dévonien.

Il attire ensuite l'attention sur un faciès de l'Ordovicien supérieur qu'il nomme "pseudo-carburé", qui est souvent situé à la base du calcaire de Bentaillou, parfois à son sommet, ou au sein de la formation. Très riche en sulfures, il n'a pas de valeur stratigraphique, mais il a souvent été observé associé à des niveaux minéralisés, malgré que son interprétation soit incertaine.

Au sujet de la géologie structurale, l'auteur distingue les failles majeures, de direction pyrénéenne, dont certaines ont joué contemporain de la sédimentation, et un système de failles subméridiennes plus récentes et à faible rejet. Il montre ensuite que les variations importantes de l'épaisseur du calcaire de Bentaillou lui donnent une forme de lentille aux bords imbriqués en doigts de gant au sein de la série de l'Ordovicien supérieur et propose de l'interpréter comme une formation récifale.

Cette paléogéographie s'accorde avec l'instabilité tectonique synsédimentaire évoquée plus haut, à laquelle devait être associée une faible activité tectonique.

G. Pouit étudie ensuite la minéralisation du Bentaillou. Après les généralités, il décrit sa morphologie et ses rapports avec la tectonique. Il décrit les associations minérales du minerai et de sa gangue, typiques des minéralisations hydrothermales sédimentaires.

Il en arrive aux autres minéralisations du dôme de Bosost, tout d'abord dans le calcaire de Bentaillou, et dans d'autres niveaux lithologiques. Ces derniers peuvent être soit l'équivalent latéral du calcaire de Bentaillou, soit un niveau plus élevé de l'Ordovicien supérieur. Il cite aussi le gisement de Bulard, qualifié de filon probable.

L'auteur souligne la persistance d'une instabilité sédimentaire révélée par la tectonique pour l'ensemble de ces gisements, et montre aussi l'omniprésence du phénomène hydrothermal dont les caractéristiques se retrouvent même dans des indices minéralisés du Dévonien.

En conclusion, G. Pouit établit des comparaisons avec d'autres gisements types par le monde. Elles lui permettent de confirmer que la minéralisation du Bentaillou s'est déposée sur un haut-fond, alors que d'autres, également d'origine hydrothermale, ont été localisées dans de petites dépressions.

Il pense que ces résultats peuvent être utiles à la recherche d'autres gisements.

L'article est bien illustré de cartes et coupes géologiques, de schémas et dessins, et comprend une liste de références bibliographiques.

Prouhet J-P. (novembre 1958) - Note sur les recherches à Sentein. Rapport B.R.G.G.M. 6 p.

Un an après l'arrêt des travaux de recherches effectuées par le B.R.G.G.M. et l'U.M.P., ce rapport fait le point des résultats, expose le bien fondé d'une reprise des recherches, et la nouvelle orientation qu'elles devraient prendre. C'est un rapport très court, mais cependant important car il prend un certain recul pour l'évaluation du gisement, "dans l'optique d'une reprise possible de la recherche", comme il est précisé au tout début.

L'auteur justifie tout d'abord les recherches faites dans la mine de Bentaillou-Rouge pendant la période 1955-1957. Il en donne succinctement les résultats géologiques et gîtologiques, sans donner de chiffres. Selon lui, seul le secteur est de la zone nord Bentaillou conserve un certain intérêt, de même qu'un petit secteur ouest non encore exploré de cette même zone.

J-P. Prouhet affirme que la mise en évidence d'une réserve de quelques centaines de milliers de tonnes dans l'emprise de la mine ne pourrait seule justifier sa réouverture. Il pense que certains indices connus dans la concession méritent un travail de recherche qui n'a encore jamais été réalisé. Le problème de Bentaillou étant assez bien connu, il propose de valoriser ces connaissances en reprenant l'étude du contexte géologique de l'ensemble de la concession.

Un plan au 1/4 000 de l'ensemble des travaux de Bentaillou-Rouge accompagne ce rapport.

Vernhet Y. (1981) - Les minéralisations zincifères de l'Ordovicien et du Dévonien du Val d'Orle (district de Sentein, Ariège), et de la région de Fourcaye (Val d'Aran, Espagne). Thèse de 3^e cycle. 226 p.

Comme l'ouvrage de Didier Fert (1976), ce mémoire est une thèse de doctorat de troisième cycle, en continuation des travaux de la même équipe du Laboratoire de Géologie Appliquée de l'Université de Paris VI en liaison avec l'Université de Toulouse.

Le secteur étudié se situe de part et d'autre de la frontière franco-espagnole : sur le versant français, la Vallée d'Orle, en Ariège, et du côté espagnol, le Val d'Aran. L'étude a été faite dans le cadre d'un ensemble cohérent et trouve son pendant avec une thèse similaire portant sur la région de Liat, en Espagne (Pascale Guérin, 1979) tandis que la thèse de Blandine Vernhet-Charron (1982) élucide la géochimie des roches encaissantes.

La zone couverte par l'étude mesure environ 7 x 5 km. en projection horizontale. Elle est contiguë à la région de Sentein sur sa limite est. Elle ne comprend pas les mines du Bentaillou, mais elle comporte les mêmes formations géologiques, et en particulier les niveaux du Bentaillou, et comprend aussi la mine du Mail de Bulard.

L'ouvrage consiste tout d'abord en une étude géologique générale complète : lithostratigraphie détaillée, avec descriptions macroscopiques et microscopiques des faciès pétrographiques, corrélations stratigraphiques et paléogéographie, étude de la tectonique et du métamorphisme.

Les minéralisations sont abordées dans le chapitre V.

Yann Vernhet n'a pas étudié la concession de Sentein, mais celles d'Orle et de Bulard citées dans le texte ci-dessus. Il aborde les minéralisations zincifères étage par étage : dans l'Ordovicien, puis dans le Dévonien inférieur. Pour chacun, il aborde les concentrations en zinc par niveau lithostratigraphique, en prenant l'exemple des principaux gisements, les mieux connus, les plus accessibles, ou les plus typiques.

Ce sont tout d'abord les minéralisations de l'Ordovicien et, à ce titre, le gisement de Bulard. Il s'agit d'une concentration en zinc dans le calcaire de Bentaillou, qui présente des analogies avec le gisement de Sentein.

Il passe ensuite à l'étude des concentrations en zinc dans "l'horizon de Crabère" (Ordovicien supérieur), avec les mines de Fourcaye, les indices de Graulles, et le gisement de "la May de Bulard" (ou Bulard-haut). Au sujet de cette dernière mine, il précise que des conditions d'accès trop risquées lui en ont interdit la visite. Son étude repose sur des documents et sur des échantillons prélevés sur des haldes.

Il passe enfin aux concentrations en blende de Fourcaye sud, dans les shales noirs qui font la transition Ordovicien-Silurien, et celles du Dévonien inférieur.

Pour chaque gisement, Y. Vernhet étudie le contexte géologique : stratigraphie, tectonique et pétrographie, puis le minerai lui-même, à l'oeil nu et au microscope, paragenèses minérales et gîtologie, et propose enfin une interprétation pour sa genèse.

Il termine par une synthèse géologique et par des conclusions gîtologiques et métallogéniques concernant les concentrations zincifères de l'Ordovicien et du Dévonien, avec quelques remarques sur les opportunités de prospection.

L'ouvrage comprend de nombreuses illustrations graphiques dans le texte, 5 planches de photographies (lames minces et échantillons pétrographiques), 4 planches hors-texte et une liste abondante de références bibliographiques.

Parmi ces planches hors-texte figure le seul plan de la mine de Bulard, au 1/500, réplique exacte du plan des travaux en 1917, entre les cotes 2502 et 2611.

Complémentaire des thèses de Didier Fert (1976) et Yann Vernhet (1981), la thèse de Blandine Charron (épouse Vernhet) soutenue en 1982 détaille la géochimie des séries encaissantes des diverses minéralisations plombo-zincifères de façon à éclairer leur mode de dépôt originel en faisant la part entre l'apport du métamorphisme et celui des phénomènes métallogéniques aux diverses périodes (Ordovicien, Silurien, Dévonien).

Visvanath S.N. (1957) - Etude géologique de la région minière de Sentein (Pyrénées ariégeoises). Thèse de Doctorat d'Université Nancy, mai 1955 ; publ. Annales de l'Ecole Nat. Sup. Géol. appl. et de Prosp. min. de l'Univ. de Nancy et du Centre de Rech. Pétro. et Géochim. (C.N.R.S.) 106 p.

Cet ouvrage publié en 1957 correspond à une thèse soutenue en mai 1955. Cette remarque prend toute son importance quand on se souvient que la production de la mine de Sentein était arrêtée depuis 1953. Toute activité de recherches n'était pas stoppée, mais ce n'est qu'en novembre 1955 que la convention tripartite a été signée entre l'U.M.P., le B.R.G.G.M. et la S.F.M.S., pour le programme de prospection qui s'est terminé en 1957. Les observations et études de l'auteur sont antérieures à ce programme, malgré leur date de publication de 1957.

Visvanath fait remarquer que "le but initial était l'étude de la minéralisation du gisement de Sentein". Le manque de données géologiques sur la région des Pyrénées ariégeoises l'a obligé à consacrer une part importante de son temps à définir le cadre géologique régional. C'est ce que traduit l'ouvrage dont les deux tiers sont consacrés à la géologie générale.

Après des généralités d'ordre géographique et un historique des connaissances géologiques sur la région, Visvanath entreprend la description stratigraphique des terrains effectivement présents dans la région de Sentein, puis il fait une étude de la tectonique : cassures et plissements, le tout en gardant une optique de géologie générale. Il développe ensuite particulièrement bien la pétrographie, en détaillant soigneusement chaque formation : examen macroscopique, microscopique et analyse chimique à chaque fois que nécessaire, et termine par l'étude du métamorphisme.

L'étude de la minéralisation commence par la mine du Bentaillou, appelée mine de Sentein. Les généralités avec ses croquis, autant que la description des chantiers d'exploitation montrent que l'auteur a passé beaucoup de temps dans la mine à travailler avec les mineurs. Il fait ensuite un inventaire minéralogique du minerai, et donne quelques analyses chimiques succinctes.

Il décrit ensuite rapidement l'ancienne mine de "la May de Bulard" qu'il n'a pas pu visiter, et quelques autres mines et indices des environs : Port d'Orle, Port d'Urets et Pic de Maubermé (Espagne), Artignac, Portillon d'Albe (fer), Uls, Crabère et Flouquet, et mentionne enfin quelques minéralisations ferrugineuses et cuprifères.

S.N. Visvanath aborde enfin l'interprétation de la minéralisation :

- sa répartition stratigraphique, tectonique, ou en fonction de la profondeur,
- sa paragenèse minéralogique, ses rapports avec le quartz,
- proposition d'un processus pour sa mise en place.

Il suggère quelques guides qui pourraient servir dans la recherche d'extensions dans des contextes similaires aux zones les plus minéralisées.

L'ouvrage se termine par une liste de références bibliographiques et une carte géologique hors-texte au 1/80 000 de la région de Sentein.

Annexe 2 - Lexique

De nombreuses définitions de termes géologiques ont été inspirées de celles données dans le "dictionnaire de géologie", de A. Foucault et J-F. Raoult, 3^eed., Masson, 1988. Pour les termes miniers, les définitions utilisent les "cahiers de terminologie" de l'industrie minière, Bureau des Traductions, Secrétariat d'Etat, n° 8, novembre 1981, et "vocabulaire de la mine souterraine", supplément à la Revue de l'Industrie Minérale, décembre 1982.

Beaucoup des termes définis ci-dessous sembleront familiers aux personnes qui s'intéressent à la géologie et à l'exploitation minière, mais il paraît utile d'en rappeler des définitions qui s'approchent de celles du milieu scientifique ou professionnel.

(1)- Le Paléozoïque correspond à l'Ere primaire (540 à 245 millions d'années), lui-même divisé en Cambrien, Ordovicien, Silurien, Dévonien, Carbonifère et Permien. L'âge de la série sédimentaire présente dans la région (Ordovicien à Dévonien) peut aller de -500 à -360 millions d'années.

(2)- Un anticlinorium est une structure d'une dizaine de kilomètres au moins, convexe vers le haut, et affecté de plis parallèles à plus faible rayon de courbure ; les éléments situés à l'intérieur de la courbure sont à l'origine les plus bas, et ce sont donc normalement les couches les plus anciennes.

(3)- Un quartzite est une roche siliceuse compacte souvent très dure, et constituée de grains de quartz intimement soudés.

(4)- Un quartzophyllade est une roche métamorphique formée de feuillets quartzitiques d'épaisseur centimétrique, alternant avec des feuillets de schiste ou de phyllade, c'est à dire de schiste ardoisier se débitant en plaques.

(5)- Un conglomérat est une roche sédimentaire détritique formée pour au moins 50 % de débris de roches de taille supérieure à 2 mm, liés par un ciment.

(6)- Le calcaire est une roche sédimentaire carbonatée contenant au moins 50 % de calcite CaCO₃, avec une proportion variable de dolomite, d'aragonite et de sidérite.

(7)- Une siltite est une roche sédimentaire consolidée provenant d'un silt, sédiment détritique meuble à grain très fin (1/256 mm à 1/16 mm).

(8)- Les feldspaths sont des minéraux de la famille des silicates, essentiels dans la plupart des roches magmatiques et de certaines roches métamorphiques, où leur abondance et leur nature potassique, sodique ou calcique intervient dans la classification de ces roches.

(9)- La pyrite est un sulfure de fer (FeS_2), jaune vif, à éclat métallique, très répandue dans des filons hydrothermaux où elle est souvent associée à d'autres sulfures, ainsi que dans certaines roches sédimentaires et métamorphiques.

(10)- La pyrrhotine (ou pyrrhotite) est un sulfure de fer complexe légèrement magnétique, jaune rougeâtre à éclat faiblement métallique, qui provient de la transformation de la pyrite à haute température.

(11)- Le terme anglais de shale désigne une roche sédimentaire argileuse ou marneuse, litée et à grain très fin.

(12)- Minéralisation : C'est une concentration locale en substances métalliques, qu'elle soit économiquement exploitable ou non.

(13)- Lithostratigraphie est un terme géologique qui englobe "lithologie", nature des roches, et "stratigraphie", succession des dépôts en couches dont l'étude permet de définir une chronologie relative.

(14)- Puissance est un terme de géologie qui désigne l'épaisseur vraie d'une couche, d'un filon ou de toute autre formation, mesurée perpendiculairement à son allongement, alors que l'épaisseur apparente est mesurée obliquement.

(15)- Un cipolin est une roche métamorphique provenant de la transformation d'un calcaire et donnant de beaux marbres dont les veines correspondent aux différentes impuretés du calcaire d'origine.

(16)- Le terme de lentille, essentiellement géométrique, désigne une masse dont l'extension horizontale, bien supérieure à l'épaisseur, se termine en biseau au sein d'une autre formation ou suivant la surface de contact entre deux couches différentes. Son origine peut être sédimentaire ou tectonique.

(17)- L'ankérite est une dolomite jaunâtre ou brunâtre, selon la proportion de fer qui est venu se substituer au magnésium.

(18)- La dolomite est un carbonate très commun de teinte souvent claire, à proportions égales de calcium et de magnésium, de formule $(\text{Ca},\text{Mg})(\text{CO}_3)_2$.

(19)- Les phyllites sont des minéraux (silicates) de compositions très variées mais se débitant tous en feuillets et auxquels appartiennent les micas et les minéraux argileux.

(20)- La paléogéographie est un modelé géographique (et son étude) acquis à une époque donnée de l'histoire géologique d'une région : rivages, montagnes, plaines, volcanisme et profondeur des mers n'avaient rien à voir avec ce que l'on peut observer aujourd'hui dans cette même région.

(21)- Le terme de conglomérat désigne une roche sédimentaire détritique constituée pour au moins 50% de débris de roches de taille supérieure à 2 mm. Quand cette taille est supérieure à 2 mm, la roche est appelée microconglomérat. Ces roches sont les témoins d'une érosion ou d'un démantèlement proche.

(22)- Le métamorphisme est une transformation tardive des roches sous l'influence conjuguée de la pression et de la température. La modification est physique, minéralogique et parfois chimique, et dépend du type de métamorphisme : (a) m. de contact, affectant toutes les formations au contact d'une roche magmatique, et (b) m. général ou régional, affectant toutes les roches sur des épaisseurs et des surfaces importantes.

(23)- L'hydrothermalisme est une manifestation tardive d'un phénomène éruptif au sens large, qui peut perdurer très longtemps. Cela consiste en des circulations de fluides chauds, chargés en éléments dont le dépôt constitue souvent des concentrations métalliques exploitables.

(24)- Orogenèse : Ce terme désigne tout processus qui engendre des reliefs, des chaînes de montagnes. La plupart du temps, il n'est pas continu, il se décompose en plusieurs phases orogéniques qui s'étalent sur un temps très long, même à l'échelle géologique. Par exemple, les phases tectoniques hercyniennes a elles seules ont duré une centaine de millions d'années, pendant la seconde moitié de l'Ere primaire.

(25)- La blende est le sulfure de zinc commun (ZnS), de couleur jaune à brun noir qui constitue le principal minerai de zinc.

(26)- La galène est un sulfure de plomb (PbS), de couleur grise, à éclat métallique vif, minerai de plomb le plus répandu et qui contient jusqu'à 1% de traces d'argent.

(27)- La chalcopryrite est un sulfure mixte de cuivre et de fer, jaune laiton ou jaune d'or, à éclat métallique, irisé de rouge et de bleu, qui constitue le minerai de cuivre le plus fréquent.

(28)- La magnétite est un des principaux minerais de fer. C'est un oxyde dont la propriété essentielle est d'être magnétique, et qui peut contenir une proportion notable de titane.

(29)- Mispickel : C'est un sulfure mixte de fer et d'arsenic, jaune très pâle à blanc, à éclat métallique, qui peut renfermer, entre autres, suffisamment d'or pour en devenir un minerai.

(30)- Inventeur, au sens minier, désigne la personne qui découvre un gisement, que celui-ci si soit ensuite exploité ou non.

(31)- Un travers-banc est un terme de mineur qui désigne, dans une mine souterraine, une galerie horizontale qui recoupe les différentes formations géologiques et qui sert de voie d'accès pour atteindre un chantier d'exploitation.

(32)- Un affleurement est la partie visible en surface d'une formation géologique en place, qui est en fait l'intersection de la surface de la terre avec cette formation géologique.

(33)- L'abattage est l'opération qui consiste à séparer des blocs de la roche massive, permettant ainsi son enlèvement et son transport. Il peut se faire à l'explosif, avec des outils à main ou mécaniques, ou par procédé hydraulique.

(34)- Une descenderie est une galerie de mine, toujours inclinée, qui permet d'accéder à la zone d'exploitation d'un gisement depuis la surface ou, par extension, depuis une galerie principale de service.

(35)- La gîtologie est l'étude des gîtes minéraux, c'est à dire des accumulations de substances minérales, le plus souvent métallifères, en quantités suffisantes pour être économiquement exploitables, de leurs dimensions et de leur géométrie. Créée à la fin des années 60 par des géologues miniers français, elle se dégage de toute théorie génétique en s'attachant au repérage et à la définition des caractères physiques généraux des gisements afin de les classer dans des types définis par des caractéristiques factuelles qui aident à leur prospection.

(36)- La métallogénie est la science qui étudie la genèse des gisements métallifères, et la formation des associations minérales successives en liaison avec l'histoire géologique de la région.

(37)- Mur : pour le mineur, c'est la formation qui se situe au-dessous de la minéralisation, et pour le géologue, c'est la surface inférieure d'une formation, donc les terrains situés au-dessous, et plus anciens, quand la série est restée en position normale.

(38)- Toit : par analogie avec le mur, c'est la formation qui se situe au-dessus du minerai ou d'une autre formation et donc normalement plus récente.

(39)- La gangue est l'ensemble des minéraux ou des roches sans valeur économique qui sont associés au minerai ou qui le contiennent.

(40)- Carotte de sondage : C'est un échantillon de roche obtenu par sondage. Son nom vient de sa forme cylindrique, due à la rotation des outils de sondage. Sa longueur très

variable (quelques millimètres à quelques mètres), est fonction des qualités mécaniques de la roche.

(41)- Stratiforme qualifie un objet géologique dans une position conforme à la stratification. Au sujet d'une concentration métallifère, il s'agit d'une couche ou d'une ou de plusieurs lentilles dont les plus grandes dimensions sont parallèles aux couches de la série.

(42)- Un gradin est un front d'exploitation limité par deux plans se coupant suivant une droite horizontale, ou presque. Ce gradin est dit "droit" quand un de ces plans, quasi horizontal, se trouve sous les pieds du mineur, et "renversé" quand il est au-dessus de la tête du mineur.

Annexe 3 – Pour en savoir plus sur le modèle Bentaillou et sa géologie. Illustrations

Articles fondamentaux et les plus récents de Georges Pouit et coll. (1979, 1986)
reproduits en *fac-simile* avec l'autorisation des éditions du BRGM

Les principaux niveaux minéralisés (Zn, Pb, Cu, Ba) du Paléozoïque des Pyrénées centrales : éléments de synthèse

Georges POUIT*
Christian BOUQUET**
Jean-Pierre BOIS***

Mots clés : Pb, Zn, Cu, Ba, Gîte-stratiforme, Ordovicien, Silurien, Dévonien, Volcano-sédimentaire, Gîte-hydrothermal, Gîte-volcanogène, Contrôle-tectonique, Syngénèse, Hautes-Pyrénées, Haute-Garonne, Ariège.

Résumé

On observe dans les Pyrénées centrales plusieurs niveaux à minéralisations stratiformes de Zn (Pb) encasées dans des formations lithologiques variées, parfois volcano-sédimentaires, d'âge ordovicien et dévonien. Les différents niveaux minéralisés actuellement connus sont inventoriés dans une colonne stratigraphique représentative du Paléozoïque et de certaines variations latérales de faciès. On doit souligner que toutes les minéralisations présentent, à diverses échelles d'observation, un air de parenté se traduisant dans le "faciès" des minerais ; néanmoins certaines différences indiquent une évolution dans le temps depuis l'Ordovicien jusqu'au Dévonien.

Quelques éléments de synthèse indiquent que la minéralisation est hydrothermale (exhalative) dans une famille générale volcanogénique, même si le lien génétique avec le volcanisme n'est pas bien compris. Nous apportons une contribution à la connaissance de cette famille de minéralisations sur deux points : une certaine indépendance, parfois, entre manifestations hydrothermales et volcaniques ; une relation étroite de la minéralisation avec une tectonique syn-sédimentaire. Cette dernière peut avoir une influence directe pour le dépôt des concentrations et/ou indirecte car elle influence la configuration des bassins sédimentaires où la minéralisation vient se déposer dans des pièges sédimentaires.

Abstract

Several different levels of stratabound mineralizations exist in various lithological formations, sometimes volcano-sedimentary, of the Ordovician and Devonian of the central Pyrénées. An inventory of this levels known to this day, is presented in a stratigraphic log which is characteristic of the mineralized paleozoic and includes local lateral changes of facies. It must be emphasized that in different scales of observation, the mineralizations are quite homogeneous, justifying their supposed common origin. However, some differences indicate an evolution in time from Ordovician to Devonian.

Some synthetic data indicate that the mineralizations are exhalative (hydrothermal) in a general volcanogenic family, even though the genetic link with volcanism is not clearly understood. A contribution to the knowledge of this family is to postulate : (1) sometimes a certain disruption between exhalative and volcanic manifestations and (2) a clear relationship with synsedimentary tectonic. The latter has a direct or/and an indirect control over the mineralization depending on its relationship with paleostructure or sedimentary sites.

* BRGM — SGN/GMX — B.P. 6009 — 45060 Orléans Cédex.

** BRGM — Louvres Barousse 65370.

*** BRGM — 25, avenue Aristide Briand, 64000 Pau.

I. Introduction

Les études effectuées depuis plusieurs années dans le Paléozoïque métamorphisé (épi à mésozone) et plissé des Pyrénées centrales, permettent actuellement de mieux localiser dans la lithostratigraphie les minéralisations à Zn dominant. Ces dernières, essentiellement concordantes mais associées parfois à des sécantes, sont connues surtout dans l'Ordovicien supérieur et le Dévonien inférieur (fig. 1) ; elles sont encaissées dans un environnement lithologique varié mais souvent carbonaté et parfois volcanique.

En dépit de différences concernant l'âge, la nature, l'intensité du métamorphisme et du plissement de l'encaissant, toutes ces minéralisations présentent un air de parenté se traduisant dans le "faciès" des minerais. Macroscopiquement, la blende forme des bancs massifs ou des lits, avec des amygdales de quartz, de carbonates ou de chloritite ; elle est interstratifiée dans une gangue quartzreuse (cherts plus ou moins recristallisés), carbonatée (à Fe, Mg) et parfois, chloriteuse, avec apparition d'amphibole dans la mésozone. Du point de vue chimique, le zinc est en moyenne quatre fois plus abondant que le plomb et le cuivre — sauf exceptions — rare. Enfin, minéralogiquement, on remarque la présence fréquente de la magnétite et la permanence de minéraux traces de Ni-Co-Sn et Ge.

Ce faciès relativement homogène de minéralisation se distingue des amas sulfurés classiques plus ou moins étroitement associés au volcanisme qui sont à pyrite et/ou pyrrhotine massives avec des proportions variables de métaux de base. Ici, c'est la blende qui est massive, tandis que les sulfures de fer, toujours présents, sont en proportion variable mais moins abondants et parfois rares.

Quelques différences doivent cependant être notées entre les minéralisations dans le Dévonien et l'Ordovicien. Du point de vue morphologique, le caractère stratiforme des minéralisations dévoniennes est accentué, les couches minéralisées ayant une extension de plusieurs kilomètres ou dizaines de kilomètres ; à l'Ordovicien au contraire on observe surtout des amas allongés (runs), plus ou moins concordants, associés à/ou indépendants de minéralisations sécantes (importants filons, stockwerks). Du point de vue chimique, le baryum, rare à l'Ordovicien, est plus abondant au Dévonien et il peut constituer des gisements (Arrens) en passage latéral de niveaux à zinc ; outre la barytine, la celsianite (feldspath barytique) peut être abondante et semble caractériser la province pyrénéenne.

L'état de nos connaissances actuelles (février 1978) sur la localisation des minéralisations dans la lithostratigraphie, résumée dans la fi-

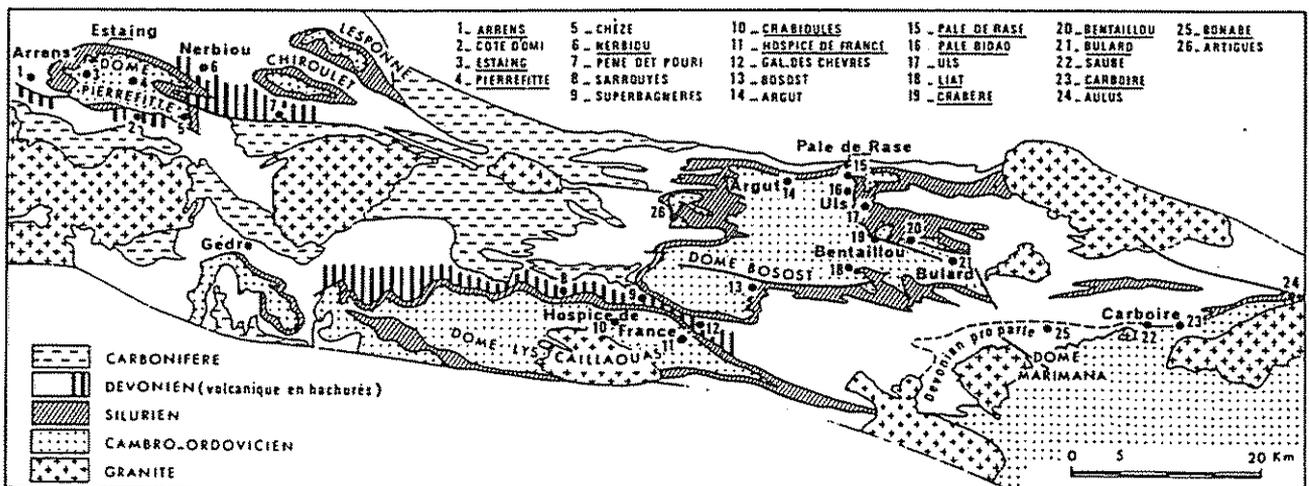
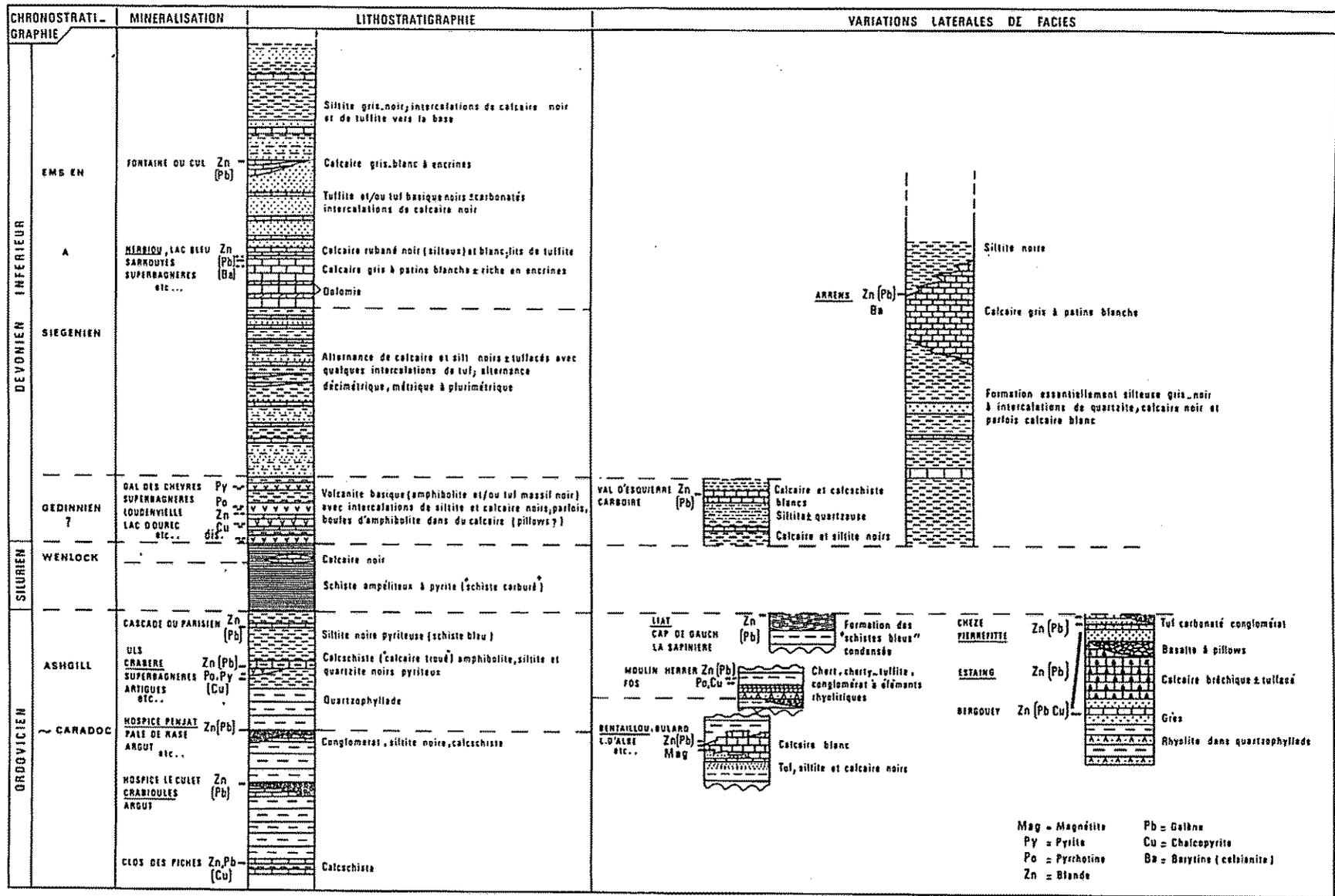


Fig. 1. — Carte géologique schématique du Paléozoïque des Pyrénées centrales et des principales minéralisations Zn (Pb) (anciennes mines soulignées).



NIVEAUX A Zn, Pb, Cu, Ba DU PALEOZOÏQUE DES PYRÉNÉES

Fig. 2. — Trois modèles montrant les relations entre paléogéographie et minéralisations Zn (Pb) dans l'Ordovicien des Pyrénées centrales (G. POUIT, Mineralium deposita).

gure 2, se rapporte principalement aux dômes de Pierrefitte, Lys-Caillaouas et Bosost. Quelques hypothèses seront faites sur les minéralisations du dôme de Marimana (Carboire, Saubé,

Bonabé) très probablement dévoniennes [DOMMANGET A., 1977] mais sous réserve de la réévaluation de la stratigraphie en cours de réalisation [DONNOT M., GUÉRANGÉ B.].

II. Minéralisation dans l'Ordovicien

Elles ont fait l'objet déjà de plusieurs publications [POUIT G., 1978 ; BOIS J.P., POUIT G., 1976] que nous résumerons en y ajoutant des observations nouvelles.

1 — Ordovicien habituel

Dans les dômes de Lys-Caillaouas et Bosost, il est constitué d'une puissante formation de quartzophyllades dont la monotonie est rompue par plusieurs intercalations lenticulaires détritiques grossières (grès et conglomérats à éléments rhyolitiques) et/ou carbonatées. Un niveau de calcschistes de quelques mètres ("calcaire troué") se trouve souvent au sommet des quartzophyllades marquant le niveau de l'Ashgill ; il est surmonté par une formation de siltites sombres ("schistes bleus"), puissante au maximum d'une centaine de mètres.

— Dans la formation de quartzophyllades, sous l'Ashgill, il existe plusieurs niveaux minéralisés associés à des conglomérats et/ou des calcschistes et siltites noirs. Il est très difficile, d'une coupe à l'autre, de faire des corrélations en l'absence de niveaux repères continus ou de datations paléontologiques précises. Toutefois, il semble que les minéralisations jalonnent, de façon discontinue, au moins trois niveaux de haut en bas : niveau de Penjat — Hospice de France (Argut, Pale de Rase, Pale Bidao, etc.), niveau du Culet de l'Hospice (probablement Crabioules) et niveau du Clos des Piches. D'autres niveaux existent probablement plus bas dans la série (Port de Venasque par exemple).

Ces niveaux minéralisés montrent — caractères inhabituels à l'Ordovicien — d'une part une extension stratiforme parfois importante (Hospice de France par exemple) et d'autre part peu ou pas de minéralisations sécantes associées. Paléogéographiquement, ils se localisent dans de petits bassins subsidents à remplissage conglomératique et silto-carbonaté à différenciation sédimentaire latérale. Le volca-

nisme se manifeste seulement par du matériel détritique et en particulier des galets de rhyolite dans le conglomérat. Tous ces caractères ont été synthétisés schématiquement dans le modèle Pale de Rase [POUIT G., 1978], représentatif d'un grand nombre de minéralisations dans l'Ordovicien.

— Le niveau Ashgill des "calcaires troués" est souvent minéralisé ; il a fait l'objet de travaux miniers à Uls, Crabère, Artigues supérieur etc. et de nombreux indices y ont été trouvés : Superbagnères, Gorges d'Eylie à Bentailou, Val d'Astau, etc. Des quartzites noirs, riches en pyrite et pyrrhotine souvent en lits lenticulaires massifs, sont parfois associés aux "calcaires troués", ainsi que des amphibolites (volcanites ?) au Mail du Cric près de Luchon. A Uls enfin, on peut observer que la minéralisation sécante mais prise dans les plissements, est étroitement associée à une faille vivante près de laquelle on observe un épaissement des calcaires [POUIT G., 1978].

— Dans les "schistes bleus" supérieurs, il existe parfois des traces de Zn, mais la minéralisation la plus notable est associée à une passée carbonatée à la cascade du Parisien, près de l'Hospice de France. D'autre part, immédiatement sous les shales noirs pyriteux du Silurien, il existe parfois des minéralisations comme à Cap de Gauch ou la Sapinière. En Espagne, l'ancienne mine de Liat se trouve au même niveau avec une série supérieure de l'Ordovicien condensée ("schistes bleus" minces et pas ou peu de "calcaires troués", communication orale N. GUÉRIN).

2. Autres faciès ordoviciens

A des variations latérales de faciès sont associées des minéralisations d'un modèle différent de Pale de Rase, le plus habituel dans les quartzophyllades ordoviciennes.

— Dans la région de Bentaillou (dôme de Bosost), de grandes masses lenticulaires de calcaires blancs, d'origine probablement récifale [LEVY C., PROUHET J.P., 1960] au moins d'après leur morphologie, apparaissent dans les quartzophyllades ; à leur base, ils contiennent parfois des tufs basiques, siltites et calcaires noirs riches en sulfures de Fe. Ces deux faciès se localisent sur ou près des failles E-W, probablement, synsédimentaires avec des rejeux plus tardifs ; latéralement, ils passent progressivement mais rapidement aux quartzophyllades. Notons enfin que le calcaire de Bentaillou est calé stratigraphiquement à une cinquantaine de mètres sous les "calcaires troués" Ashgill.

Des minéralisations à Zn (Pb) et magnétite se localisent à la base ou dans le calcaire de Bentaillou (types pénécordants ou sécants), mais surtout à son sommet (type concordant). Les caractères de cette minéralisation ont permis de définir le modèle Bentaillou [POUIT G., 1978] ; il est important car, d'une part, il semble répétitif dans d'autres niveaux du Paléozoïque des Pyrénées (Dévonien en particulier) et, d'autre part, il correspond à des concentrations plus riches. Remarquons qu'en dehors de Bentaillou, des traces de minéralisations ont été observées aussi, avec des caractères semblables, dans le dôme de Marimana.

— Dans le dôme de Pierrefitte, la partie supé-

rieure de l'Ordovicien (Caradoc pro-parte) est constituée de calcaires bréchiques, plus ou moins tuffacés avec des spilites à pillows. Il repose sur des quartzophyllades avec des intercalations de laves rhyolitiques. Des minéralisations sécantes (importants filons, stockwerks) et concordantes (amas et couche), plus ou moins étroitement associées, appartiennent à un troisième modèle [BOIS J.P., POUIT G., 1976]. Il est caractérisé par un jeu saccadé de failles en même temps que l'émission de laves, déterminant un système de horsts émergés et de grabens. C'est l'un des cas dans les Pyrénées où la minéralisation est assez étroitement associée à une phase volcanique basique à laves et tufs succédant à une phase acide. Ce district a donné lieu aussi à la plus importante exploitation de la province soit au moins 2,5 Mt à environ 10 % Zn-Pb.

— Vers le sommet des quartzophyllades des dômes de Bosost (Artigues supérieur) et peut-être de Lys-Caillaouas (Moudang), apparaît parfois un niveau sporadique de chert, chertyuffite et greywacke conglomératique avec des bancs de pyrrhotine (pyrite) massive à chalcoppyrite relativement abondante et Zn (Pb). Ce type de minéralisation, inhabituellement riche en Cu pour les Pyrénées, pourrait être en relation avec un volcanisme acide encore mal connu et représenter un modèle plus proche des amas sulfurés "classiques".

III. Minéralisation dans le Dévonien

1 — Le Dévonien inférieur normal

La lithologie du Dévonien inférieur est très complexe car cette période est caractérisée par une grande instabilité tectonique déjà soulignée par C. BOUQUET et D. STOPPEL [1975]. Cette instabilité se traduit par, d'une part de rapides et importants changements latéraux de faciès et, d'autre part, des structures sédimentaires indiquant des glissements sous-aquatiques (slumpings, brèches, olistostromes etc.). Le déchiffrement de cette lithologie est souvent rendu difficile par l'existence d'une tectonique en plis serrés, étirés et déversés, associée à une forte schistosité ; ce style contraste avec les larges structures anticlinoriales plus ou moins faillées de l'Ordovicien où les reconstitutions paléogéographiques sont plus faciles.

Il est constitué de siltites grises ou noires puis de barres de calcaires ou calcschistes à intercalations de siltites. L'un de ces premiers bancs calcaires contient un mince niveau à pyrite, blende (barytine) disséminées suivant le litage et qui semble continu depuis Aulus jusqu'au dôme de Bosost (niveau du Pic de Carboire). En dehors de cette minéralisation, en général pauvre sauf dans les zones de charnières décamétriques microplissées, quelques autres indices sont connus mais n'ont pas fait l'objet d'études détaillées.

2 — Le Dévonien inférieur de type Nerbiou

Il correspond à celui représenté dans la coupe principale de la figure 2 car c'est celui le mieux minéralisé et qui montre une assez grande extension : zone E du Nerbiou jusqu'au Tourmalet, sud et ouest du dôme de Pierrefitte, enfin une large bande en bordure nord du dôme de Lys Caillaouas (zones hachurées de la figure 1). Nous en donnerons une description succincte une étude plus détaillée du secteur de Sarrouyes où l'on observe les plus belles coupes, faisant l'objet d'une note séparée [BRAUX C., POUIT G.].

Ce Dévonien inférieur correspond à une unité volcanique (basique) et sédimentaire dont la puissance peut dépasser 800 m et où l'on peut distinguer quatre formations :

— La formation inférieure 1, puissante de plus de 100 m, est constituée de formations très noires à pyrite-pyrrhotine, avec des siltites à passées calcaires et des intercalations plus ou moins nombreuses et épaisses de tufs basiques et d'amphibolites. Ces dernières roches, très dures, graphiteuses et denses, sont parfois très riches en sulfures de fer, donnant une patine rouillée, avec des mouches de chalcopyrïte, d'arsenopyrite et de blende disséminées, en lits ou en veinules. Certaines amphibolites se présentent en grandes boules dans des sédiments (pillows ?) et montrent parfois une structure ophitique [POUIT G., ALSAC C., 1978]. Souvent cette formation a été confondue avec les shales noirs siluriens immédiatement sous-jacents en raison de sa couleur, des surfaces altérées rouillées et de sa richesse en sulfures de fer.

— La formation 2 est constituée d'une alternance en bancs décimétriques, métriques ou plurimétriques de siltites et calcaires noirs contenant plus ou moins de matériel tuffacé.

— La formation 3 est une barre de calcaire gris à patine blanche, souvent à encrines, puissante d'une centaine de mètres, avec parfois des intercalations boudinées de dolomie à patine rousse. Ces calcaires constituent un métalotecte important dans les Pyrénées : en effet, c'est à son sommet et avec une extension régionale que se localise la minéralisation Zn (Pb) de type Nerbiou. Cette dernière se présente en bancs massifs, riches souvent en amphibole et magnétite, ou en rubans qui affectent le sommet du calcaire blanc et un mince niveau de calcaires rubanés noirs (siltotuffacés) et blancs faisant transition avec la formation supérieure.

— La formation 4 est constituée sur plus de 100 m de tuffites et/ou tufs à intercalations de calcaires noirs plus ou moins tuffacés avec, vers son sommet, des récurrences lenticulaires de calcaires blancs qui peuvent être minéralisés. Plus haut, elle passe insensiblement à des siltites gris-noirs à intercalation de calcaires noirs et de grès.

La minéralisation dans le Dévonien inférieur de faciès Nerbiou, apparaît donc à deux niveaux et plus ou moins étroitement associée à des manifestations volcaniques basiques. Dans la formation 1 encore mal connue, ces manifestations sont des tufs et des laves basiques avec une minéralisation inhabituelle dans les Pyrénées par sa morphologie et la présence de cuivre. Au sujet du second niveau minéralisé dans les calcaires blancs (mine du Nerbiou), on peut faire les remarques importantes suivantes :

— la minéralisation se situe au sommet d'une barre de calcaires blancs à encrines dont la puissance varie et qui est parfois lenticulaire ; en raison des plissements, il est difficile de donner une interprétation générale des variations de puissance mais, dans certains cas, il est certain que la forme lenticulaire est sédimentaire et peut-être d'origine récifale ;

— le sommet des calcaires blancs mais surtout le niveau minéralisé et les calcaires rubanés noirs et blancs associés, montrent souvent d'intenses déformations sédimentaires (slumpings) qui n'apparaissent pas — ou moins — dans la formation alternante 2 ;

— enfin, succédant immédiatement au niveau minéralisé, apparaît une puissante formation tuffacée, souvent encore riche en sulfures de Fe avec parfois des traces de blende.

D'une part, on notera que la minéralisation apparaît à une période d'instabilité tectonique se traduisant dans la sédimentation (slumpings et peut-être édifices récifaux) et marquant le début d'une période volcanique à manifestations tuffacées. D'autre part, l'environnement et les minéralisations montrent des analogies avec le modèle ordovicien Bentaillou évoqué plus haut.

3 — Autres faciès du Dévonien inférieur

Comme nous l'avons déjà signalé, cette période est caractérisée par de nombreuses et rapides variations de faciès qui ne sont encore qu'incomplètement connues. Nous en

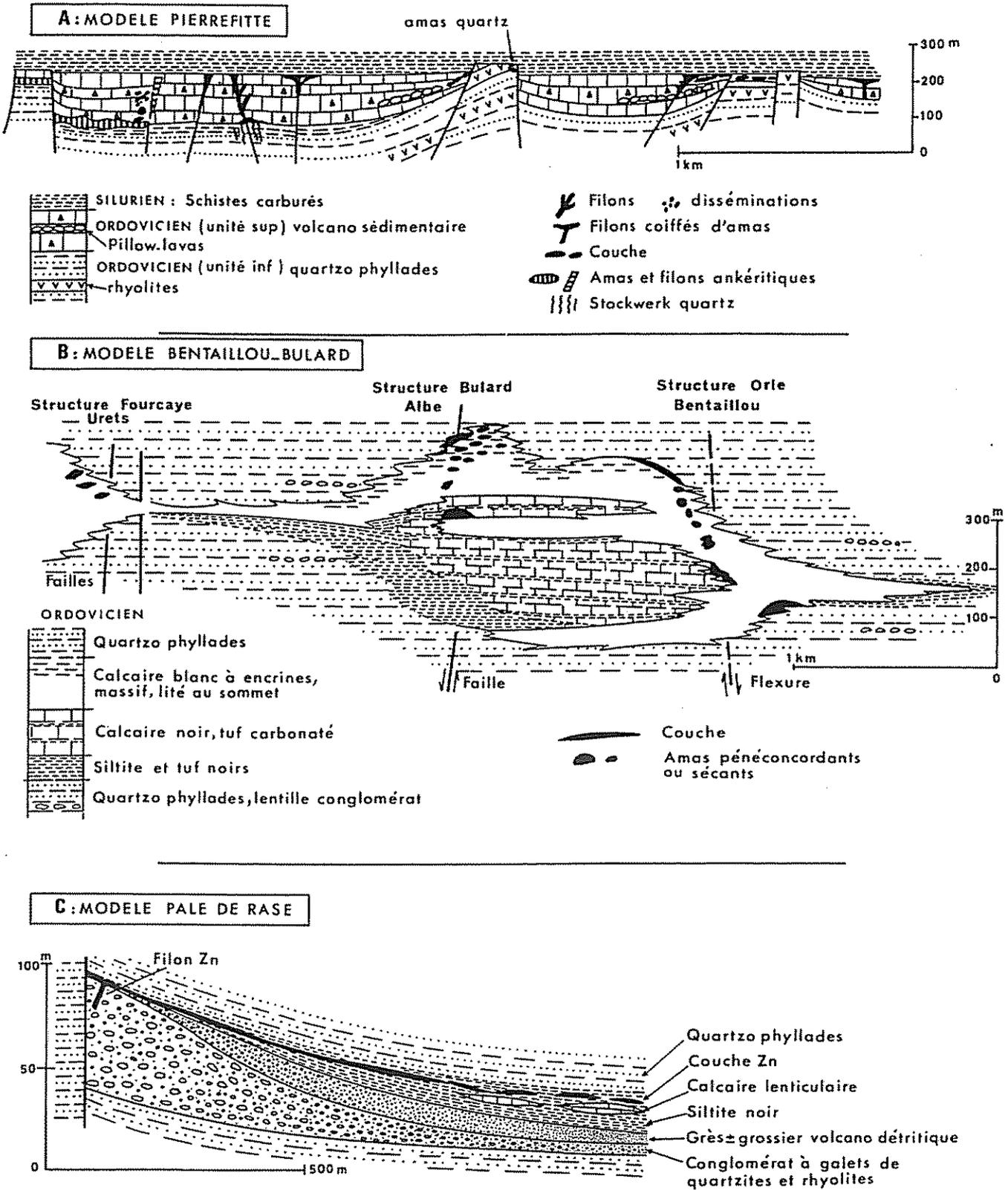


Fig. 3. — Coupe N-S du synclinal d'Arrens de part et d'autre de la vallée.

signalerons trois qui font l'objet de quelques observations plus précises.

— La formation inférieure 1 volcano-sédimentaire du Dévonien de type Nerbiou, passe latéralement, comme on peut l'observer à Superbagnères par exemple, à des siltites quartzueuses à lits de calcaires noirs et lentilles de calcschistes blancs. Ces derniers contiennent des indices de Zn (Pb) au Val d'Esquierre. Avec beaucoup de réserves quant aux corrélations stratigraphiques, on note ici des analogies avec l'environnement des minéralisations de la bordure du dôme de Marimana (Carboire).

— A Arrens (Ouest de Pierrefitte), il existe une couche de Ba-Zn, avec une zonalité latérale, qui affleure sur plus de 5 km sur les deux flancs d'une structure synclinale affectée de plis d'entraînement (fig. 3). Cette minéralisation surmonte une puissante formation de calcaire blanc intercalée entre deux formations de siltites gris-noir. Immédiatement au sud, après passage d'un accident important, on retrouve les faciès de type Nerbiou.

Les masses calcaires d'Arrens, tout à fait exceptionnelles dans le Dévonien des Pyrénées, ne résultent certainement pas seulement de la tectonique mais correspondent, très probablement, à des accumulations récifales. Les minéralisations qui leur sont associées montrent beaucoup de ressemblances avec celles de Meggen dans le Dévonien moyen du Hartz en Allemagne [AMSTUTZ G.C. et al. 1971 ; EHRENBURG H. et al. 1954 ; GWOSDZ VON U. et al. 1974 ; GASSER E. 1974].

Signalons aussi dans le district à l'est du Nerbiou, l'existence de panneaux structuraux séparés des faciès volcano-sédimentaires par d'importants accidents directionnels E-W. Là aussi, dans un Dévonien inférieur essentiel-

lement silteux, on observe des masses lenticulaires de calcaires blancs couronnées par une formation siliceuse à blende et galène.

— dans le secteur d'Arre et Anglas, à l'ouest d'Arrens, le Dévonien est beaucoup plus métamorphique en raison d'un dôme de granite sous-jacent. Il semble que le Dévonien inférieur soit ici essentiellement silteux ; des minéralisations à Zn (Pb) apparaissent à la base mais surtout au sommet, ces dernières associées à de petits bancs de calcaires lumachelliques. Toutefois ici, les principales minéralisations exploitées (mines d'Arre et Anglas) sont des remaniements épigénétiques associés aux intrusions du granite ; elles se localisent à l'intersection des niveaux porteurs stratiformes avec des failles jalonnées de microgranites [REYX J. 1973].

En conclusion, il existe en général deux périodes de minéralisations dans le Dévonien inférieur des Pyrénées centrales : la première, vers la base, dans des formations volcaniques ou silto-carbonatées ; la seconde, plus haut, presque toujours associée à des calcaires blancs plus ou moins lenticulaires surmontés de tufs. Les minéralisations à Zn (Pb) avec Ba (barytine, parfois abondante et celsianite presque toujours présente) ont une présentation variable suivant la nature de l'environnement lithologique. Ce dernier varie rapidement près de failles (à jeu hercynien et/ou pyrénéen) qui, pour cette raison principalement, semblent avoir joué aussi un rôle paléogéographique important. Enfin, on constate que le type le plus important et étendu de minéralisation (Nerbiou) présente des analogies étroites avec Bentaillou à l'Ordovicien. Malheureusement, en l'état de nos connaissances, l'intensité des plissements ne permet pas de reconstituer un modèle dévonien aussi détaillé qu'à Bentaillou.

IV. Eléments de synthèse

Nous essaierons ici de dépasser le point de vue d'analyse et de classement des minéralisations pour essayer de dégager quelques observations générales à l'échelle du Paléozoïque des Pyrénées centrales. A ce stade qui doit être considéré comme provisoire, nous ajouterons aux observations des interprétations qui ne sont pas toujours solidement étayées, concernant surtout le volcanisme et la paléogéographie.

BULL. B.R.G.M. (2), 11, 1-1979

1 — Minéralisation et volcanisme

Les minéralisations qui présentent une assez grande homogénéité de "faciès", en particulier par leur composition à blende massive dominante, peuvent être plus ou moins étroitement associées à des manifestations volcaniques. Ces dernières, essentiellement basiques à intermédiaires, produisent plutôt des tufs et tuffites que des laves. Ce volcanisme est juste antérieur

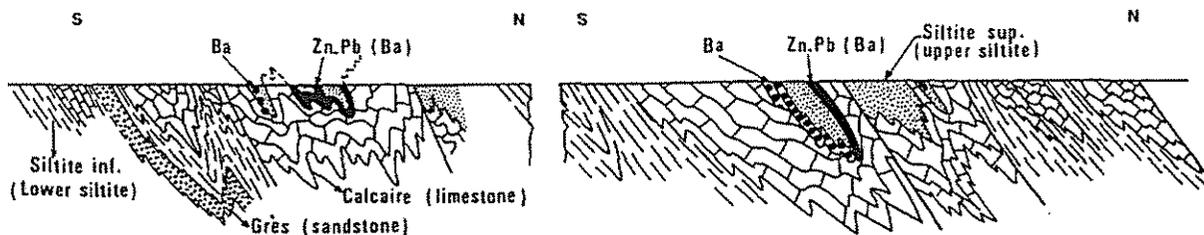


Fig. 4. — Les différents niveaux minéralisés du Paléozoïque des Pyrénées centrales.

(Ordovicien de Pierrefitte), contemporain (base du Dévonien) ou immédiatement postérieur (Dévonien du Nerbiou) à la période de dépôt de la minéralisation. Enfin, il est important de souligner que des minéralisations identiques peuvent être présentes et importantes aux mêmes périodes mais sans manifestations volcaniques associées et dans un environnement uniquement sédimentaire.

Cette relative indépendance spatiale des concentrations avec le volcanisme, nous semble un caractère important des minéralisations pyrénéennes. A notre avis, ce caractère est probablement assez général du type amas sulfuré volcanogénique et la liaison spatiale avec les zones émissives de laves, bien que fréquente, n'est nullement générale et obligatoire.

2 — Minéralisation et paléogéographie

Un résultat général a été acquis concernant l'ensemble des minéralisations ordoviciennes [POUIT G., 1978]. En effet, les différents modèles minéralisés de cette période montrent que leur caractère commun est la présence d'une instabilité tectonique (jeu de failles) synsédimentaire, avec parfois des manifestations volcaniques, qui se sont traduites dans la sédimentation par des effets variés : système de horsts émergés et érodés ou immergés avec développement de récifs ou bassin subsident. Ces différents environnements définissent aussi les pièges de la minéralisation et l'on remarque une association de types concordants et sécants dont la mise en place est pénécontemporaine.

Au Dévonien inférieur, cette instabilité tectonique était aussi manifeste et particulièrement intense au moment du dépôt des minéralisations. Elle s'est traduite par des effets variés dans la sédimentation et l'on retrouve parfois des modèles semblables à ceux observés à l'Ordovicien (analogie de Bentaillou et du Nerbiou).

Cette permanence des caractères paléogéographiques ne doit pas cacher cependant une

certaine évolution des minéralisations au Dévonien comparativement à celles ordoviciennes :

- environnement moins détritique grossier et plus carbonaté ;
- baryum toujours présent et parfois abondant ;
- quasi absence de minéralisations sécantes associées à des concordances ;
- association de minéraux traces (Ni, Co, Sn, Ge etc.) plus pauvre qualitativement et quantitativement ;
- enfin, meilleur coefficient de "stratiformité" (grande extension, aspect concordant plus strict).

Cette évolution peut être parallélisée avec une relation en général étroite des minéralisations ordoviciennes avec la tectonique, tandis que celles dévoniennes présentent un caractère plus sédimentaire. En même temps on constate, dans le premier cas, la présence de minéralisations sécantes pouvant représenter plus ou moins des griffons d'alimentation ce qui, dans l'état actuel de nos connaissances, n'a pas été observé dans le Dévonien. Enfin, alors que les minéralisations ordoviciennes sont dans un environnement lithologique varié, celles dévoniennes sont surtout en relation avec un milieu carbonaté et souvent au sommet de masses calcaires pouvant représenter des récifs. Signalons aussi que les minéralisations de l'Hospice de France dont certaines présentent une extension stratiforme plurikilométrique dans des calcschistes ordoviciens, préfigurent déjà un type qui devient plus général au Dévonien. Toutefois, pour les minéralisations dans le Dévonien, une meilleure analyse est encore nécessaire afin de connaître les relations des concentrations avec la tectonique synsédimentaire et la sédimentation elle-même.

3 — Minéralisations et manifestations hydrothermales

C'est seulement à l'Ordovicien que l'on observe des altérations hydrothermales à quartz,

carbonates (Fe, Mg) et chlorite, associées aux minéralisations sécantes comme dans le dôme de Pierrefitte par exemple [BOIS J.P., POUIT G., 1976]. Sous l'effet du métamorphisme régional mésozonal, on observe en outre l'apparition d'amphiboles (actinote, grunérite), de biotite, de grenat, etc. Ces différents minéraux se retrouvent dans la gangue des filons mais aussi sous forme d'intercalations (en particulier cherts plus ou moins recristallisés en quartz) dans les minéralisations stratiformes aussi bien ordovi-ciennes que dévoniennes. Une mention particulière doit être faite pour la magnétite qui semble indépendante du degré de métamorphisme et abondante surtout dans les minéralisations riches (Pierrefitte, Bentaillou, Le Nerbiou).

Une telle association de sulfures à des dépôts de précipitation chimique est un caractère habi-

tuel des minéralisations "exhalatives", ou mieux hydrothermales, associées au volcanisme. Comme pour la magnétite, ces dépôts sont particulièrement abondants et de composition variée dans certaines minéralisations riches de l'Ordovicien (Pierrefitte, Bentaillou) et du Dévonien (Le Nerbiou). Toutefois, elles sont moins développées dans les minéralisations à caractères plus sédimentaires, ce qui est le cas général au Dévonien.

Sans que l'on puisse en faire une règle générale, il existe aussi une certaine évolution dans les manifestations hydrothermales responsables des minéralisations ordovi-ciennes et dévoniennes. Cette évolution se caractérise aussi du point de vue chimique par la présence, et parfois l'abondance, du baryum au Dévonien, alors qu'il est exceptionnel à l'Ordovicien.

V. Conclusion

La province du Paléozoïque des Pyrénées centrales comporte plusieurs niveaux minéralisés à Zn (Pb) dans l'Ordovicien et le Dévonien dont certains se sont déposés à une époque plus ou moins pénécotemporaine de manifestations volcaniques basiques à intermédiaires. Cependant, on n'observe pas toujours une relation étroite avec des époques ou des zones où le volcanisme a été plus intense. L'homogénéité de "faciès" de toutes ces minéralisations — en dépit de différences relativement mineures — indique qu'elles ont pourtant une origine commune et elles peuvent être rapportées à la famille des dépôts volcanogéniques.

De tels dépôts sont caractérisés par les faits suivants : la minéralisation provient de solutions hydrothermales dont le lien génétique avec le volcanisme est mal connu, ayant circulé dans des failles et s'étant déposées sous forme de types morphologiques sécants ou concordants plus ou moins associés. De plus, ces dépôts comportent non seulement des métaux mais aussi des minéraux de gangue dans les filons ou de précipitation chimique dans les couches.

Une conclusion générale de notre étude est de montrer que les manifestations hydro-

thermales et volcaniques peuvent être relativement indépendantes dans le temps et l'espace. En revanche, la tectonique synsédimentaire est souvent susceptible de fournir des guides plus précis pour la localisation des concentrations. Cette tectonique peut jouer un rôle soit direct, les concentrations se déposant près de failles dont on observe surtout les rejeux postérieurs, soit indirect en contrôlant la sédimentation et la configuration des bassins, créant des pièges pour les minéralisations.

Remerciements

Ce travail est le fruit d'une collaboration entre géologues du Bureau de recherches géologiques et minières, soit du Service géologique national, soit de la Division minière Sud-Ouest. Il a bénéficié en outre d'une aide de la Délégation générale à la Recherche scientifique et technique dans le cadre d'une action concertée "Valorisation des ressources du sous-sol". Nous remercions plus particulièrement R. MOUSSU qui a relu notre manuscrit.

Références bibliographiques

- AMSTUTZ G.C., ZIMMERZMAN R.A., SCHOT E.M. (1971). — The Devonian mineral belt of Western Germany (the mines of Meggen, Ramsbeck et Rammelsberg). Sedimentology of parts of Central Europe, Guide book VIII, Int. Sedim. Congr., pp. 253-272.
- BOIS J.P., POUIT G. (1976). — Les minéralisations Zn (Pb) de l'anticlinorium de Pierrefitte : un exemple de gisements hydrothermaux et sédimentaires associés au volcanisme dans le Paléozoïque des Pyrénées centrales. *Bull. B.R.G.M.*, Fr., Sect. II, n° 6, pp. 536-567, 14 fig.
- BOUQUET G., STOPPEL D. (1975). — Contributions à l'étude des Pyrénées centrales (Hautes vallées de la Garonne et de l'Aure). *Bull. B.R.G.M.*, Fr., Sect. I, n° 1, pp. 7-61, 22 fig.
- DOMMANGET A. (1977). — Le cadre géologique des niveaux minéralisés (Pb-Zn) du Paléozoïque de la zone axiale des Hautes Pyrénées Ariégeoises (secteur Aulus — Port d'Aula). Thèse 3ème cycle, Paris VI.
- EHRENBERG H., PILGER A., SCHRÖDER F. (1954). — Das Schwefelkies Zinkblende Schwerspatlager Von Meggen (Westfalen). Monographie 7, Beihefte Zum Geologischen Jahrbuch, heft YZ, 352 p.
- GASSER VON U. (1974). — Zur stuktur and geochemic der stratiformen sulfid lagerstätte Meggen. *Geol. Rundschau*, 63, 1, pp. 53-73.
- GWOSDZ VON U., KRUGER H., PAUL D., BAUMANN A. (1974). — Die Liegend — schichten der Devonischen pyrit schwerspart Lager Von Eisen (Saarland), Meggen und der Rammelsberg. *Geol. Rundschau*, 63, 1, pp. 75-93.
- LEVY C., PROUHET J. (1960). — Géothermométrie du gisement plombo-zincifère de Sentein (France). XXI IGC, Part. VI, Copenhague.
- POUIT G. (1976). — Gisements et volcanisme. *Mém. hors série, Soc. Géol. Fr.*, 7, pp. 115-126.
- POUIT G., ALSAC C. (1978). — Les faciès noirs tuffacés du Dévonien et de l'Ordovicien des Pyrénées centrales et leurs minéralisations Zn (Pb). *C.R. Acad. Sci. Fr.*, 287, (D), pp. 415-418.
- POUIT G. (1978). — Différents modèles de minéralisations "hydrothermale sédimentaire" à Zn (Pb) du Paléozoïque des Pyrénées Centrales. *Minéral. Deposita (Berl.)*, 13, pp. 411-421, 5 fig.
- REYX J. (1973). — Relations entre tectonique, métamorphisme de contact et concentrations métalliques dans le secteur des anciennes mines d'Arre et d'Anglas (Hautes Pyrénées, Pyrénées Atlantiques). Thèse 3ème cycle. Un. Paris VI.

Les minéralisations Zn-Pb exhalatives sédimentaires de Bentaillou et de l'anticlinorium paléozoïque de Bosost (Pyrénées ariégeoises, France)

Georges POUIT *

Zn-Pb exhalative sedimentary mineralization at Bentaillou and in the Paleozoic anticlinorium of Bosost, the Ariège Pyrénées, France.

Mots-clés : Plomb substance, Zinc substance, Indice minéral, Gîte stratiforme, Calcaire, Quartzite, Haut fond, Altération sous-marine, Run, Ariège (Minç Bentaillou, Dôme Bosost).

Abstract

The Bentaillou mineralization, one of the main Zn-(Pb) productive mines in the Pyrénées (120 000 t metal) occurs as a run at the top of white limestone deposited on a high (reef ?) and intercalated in Ordovician siltite and quartzite. This conformable run and the unconformable or peneconformable mineralizations at the footwall of the former underwent tectonic and metamorphic processes. Both display the same mineralogical association and gangue (silica, Fe-Mg carbonates, silicates) as the other mineralization in the Paleozoic formation of the Pyrénées.

Other types of mineralization located in various stratigraphic layers Ordovician in age are present but in a different lithological host rock : conglomerate of the Pale de Rase type, Asghill calcschists, calcareous silt and microconglomerate at the Ordovician top as at Liat and

Fourcaye. Their characteristics may be compared with these of Bentaillou : unstable setting during sedimentation, concentrations near syndepositional faults, association of folded, metamorphosed unconformable and conformable mineralization and same mineralogical association and gangues.

All the Ordovician mineralization and that in the Pierrefitte dome show the same basic hydrothermal (or exhalative) sedimentary characteristics. The most significant is located in highs where structural controls prevail over sedimentary traps. Contrary to Pierrefitte, the Bentaillou mineralization is not spatially related to volcanism ; however this one may have taken place at Bosost during Ordovician time but it is only represented now by reworked detrital formation.

Résumé

La minéralisation de Bentaillou, l'une des principales mines productrices de Zn-(Pb) des Pyrénées (120 000 t métal), se présente en runs au sommet d'un calcaire blanc déposé sur un haut-fond (récif ?) et intercalé dans des siltites et quartzites ordoviciens. Cette minéralisation concordante et celles discordantes ou pénéconcordantes situées au mur de la précédente, sont affectées par la tectonique et le métamorphisme. Elles contiennent la même association minéralogique et les mêmes gangues (silice, carbonates Fe-Mg, silicates) que l'ensemble des minéralisations du Paléozoïque des Pyrénées.

De nombreuses autres minéralisations sont présentes à d'autres niveaux stratigraphiques de l'Ordovicien mais dans un encaissant lithologique différent : conglomérat type Pale de Rase, calcschistes Asghill, silt carbonaté et microconglomérat du sommet de l'Ordovi-

rien (Liat, Fourcaye). Elles présentent avec Bentaillou des caractères communs : environnement instable en cours de sédimentation avec des concentrations près des failles syndépôtives, association de minéralisations concordantes et discordantes plissées et métamorphisées, même association minéralogique et mêmes gangues.

L'ensemble de ces minéralisations, comme celles semblables du dôme de Pierrefitte, montrent ainsi les caractères fondamentaux du type hydrothermal (ou exhalatif) sédimentaire. Les plus importantes se localisent sur des hauts-fonds où les contrôles structuraux prédominent sur les pièges sédimentaires. Contrairement à Pierrefitte, il n'existe pas de lien spatial avec un volcanisme ; ce dernier a pu toutefois être présent dans l'Ordovicien de Bosost mais ne se présente plus que sous forme détritique remaniée.

Introduction

Le Paléozoïque des Pyrénées centrales contient de nombreuses mines de Zn-Pb localisées dans des dômes à cœur ordovicien ; les principaux d'entre eux sont, d'ouest en est, les dômes de Pierrefitte, Caillaouas, Bosost et Marimaña. L'ancienne mine de Bentaillou est située sur le dôme de Bosost.

Ce dôme, à cheval sur la frontière espagnole, contient

un grand nombre d'indices dans le Dévonien et surtout dans d'Ordovicien avec les anciennes mines de Bentaillou (ou Sentein), Bulard et Bularic en France et de la Fourcaye, Liat, Bosost (Victoria et Margarita) en Espagne.

L'ordre de grandeur de ces mines est de quelques centaines de milliers à 1 MT ou plus de minerai à des teneurs d'environ 10 % Zn + Pb (Zn dominant largement sur Pb) et quelques dizaines de grammes par tonne d'Ag. La mine de Bentaillou a été surtout active jusqu'en 1954 et avait produit à cette date environ

* BRGM, Département Gîtes minéraux, BP 6009, 45060 Orléans Cedex 02, France et Université d'Orléans, Département Sciences de la Terre, 45046 Orléans Cedex 02, France.

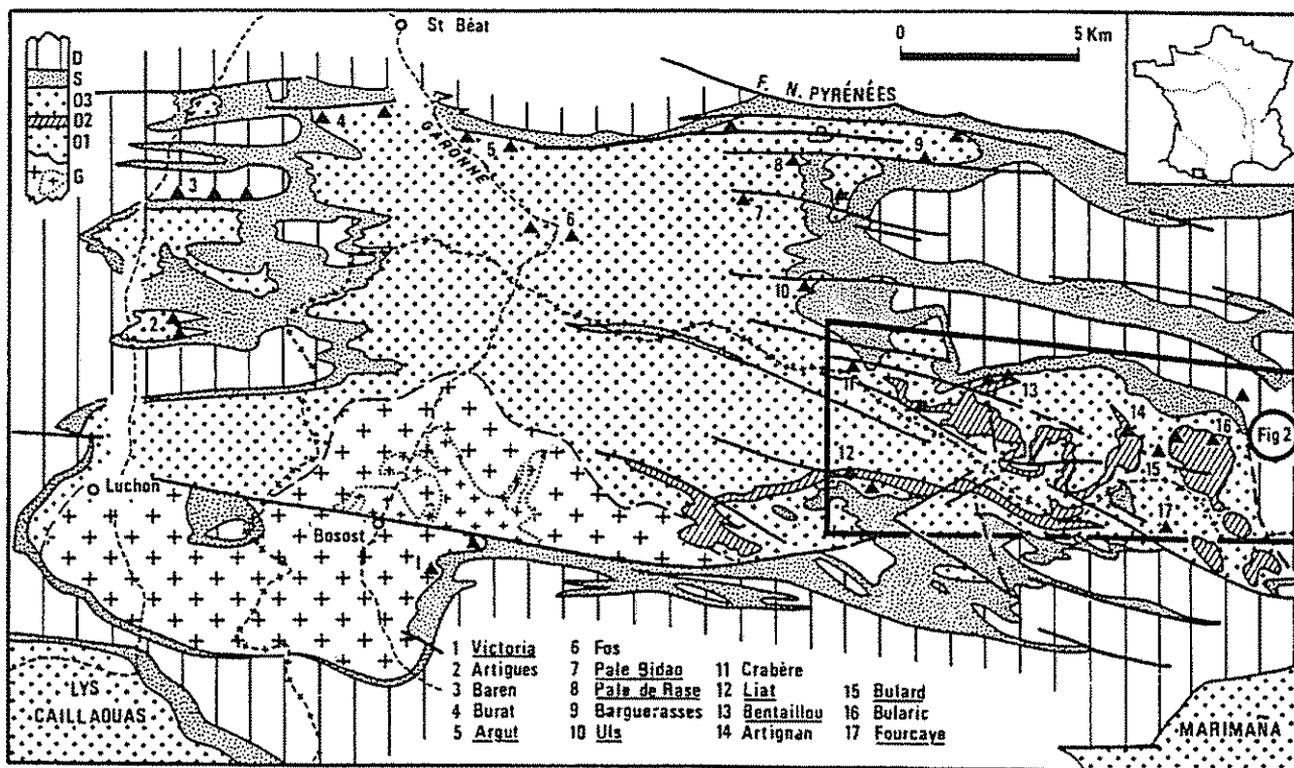


Fig. 1. - Schéma géologique du dôme de Bosost (d'après L.U. de Sitter et H.J. Zwart, 1962, modifié) et des minéralisations Zn-Pb (anciennes mines soulignées).

D : calcshistes dévoniens ; S : shales noirs siluriens ; O : Ordovicien (O1 : quartzites, O2 : calcaires, O3 : quartzites et siltites) ; G : granites hercyniens et cornéennes.

120 000 t de Zn-Pb. Diverses raisons ont entraîné sa fermeture sans que la mine soit totalement épuisée.

Le secteur de Bentaillou, objet principal de cette étude, a déjà fait l'objet de descriptions inédites par J.-P. Destombes, de deux thèses (S.N. Visvanath, 1957 ; D. Fert, 1976) et, à l'occasion d'une synthèse sur les minéralisations des Pyrénées, de la reconstitution d'un modèle schématique (G. Pouit, 1978). A partir de ces études et de travaux nouveaux effectués depuis une dizaine d'années, il est possible de donner une description plus précise de la géologie et de mieux reconstituer le type et le modèle minéralisés.

1. Géologie et horizons minéralisés

L'anticlinorium E-W de Bosost est une structure relativement simple (fig. 1). A cœur d'Ordovicien, il est bordé sur ses deux flancs par du Silurien et du Dévonien et, localement, comme à Bosost en Espagne, intrudé de massifs granitiques hercyniens. Cet anticlinal est affecté de plis-failles E-W ; il montre un plongement vers l'ouest en doigts de gant sous le Silurien et le Dévonien, tandis que vers l'est, il subit une virgation vers le sud-est sous l'effet d'un accident sub-méridien pyrénéen (faille de la Vallée d'Orle) ; au-delà, il est relayé par l'anticlinorium de Marimaña (fig. 1) avec l'ancienne mine de Zn-Pb de Bonabé en Espagne et l'important prospect de Carboire en France (J.P. Bois *et al.*, 1972).

Le Paléozoïque est affecté par un métamorphisme épi à mésozonal, plus intense (biotite, sillimanite, cordiérite) dans une large auréole autour du granite de Bosost. Les

principaux plissements sont hercyniens, à axe 90° et 110°, avec une schistosité, souvent peu marquée, de même orientation. D'importantes failles sub-directionnelles, rejeux fréquents d'anciennes structures, sont associées à cette phase hercynienne ; elles ont pu rejouer aussi au pyrénéen (alpin), mais cette phase est aussi marquée par des fractures méridiennes, importantes seulement dans la vallée d'Orle. Comme c'est le cas fréquent dans les Pyrénées (G. Pouit et J.P. Bois, 1986), il existe une dysharmonie dans le style tectonique en relation avec la lithologie : structures amples et simples dans le soubassement quartzitique ordovicien, plus serrées dans le matériel silto-carbonaté dévonien séparé du précédent par des shales noirs siluriens peu compétents (niveau plastique).

1.1. Lithologie et stratigraphie

Les shales noirs siluriens, datés par graptolites, séparent une série inférieure cambro (?) - ordovicienne surtout quartzo-silteuses, d'une série dévonienne silto-carbonatée (fig. 2 et 3).

L'Ordovicien dans la zone orientale du dôme de Bosost comporte, de bas en haut trois unités :

— L'unité inférieure O1 (plusieurs centaines de mètres) est constituée de quartzites, de grauwackes et de quartzo-phyllades, en général régulièrement rubanés et montrant souvent des structures sédimentaires obliques. Elle contient plusieurs intercalations lenticulaires de conglomérats intraformationnels à galets d'encaissant et parfois de rhyolites et d'albitites, avec un ciment riche en quartz rhyolitique. Sur la piste de la mine de Bentaillou, on observe six intercalations de conglomérats dont une très proche de l'unité sus-jacente.

— L'unité moyenne O2 (en moyenne 100 m, mais

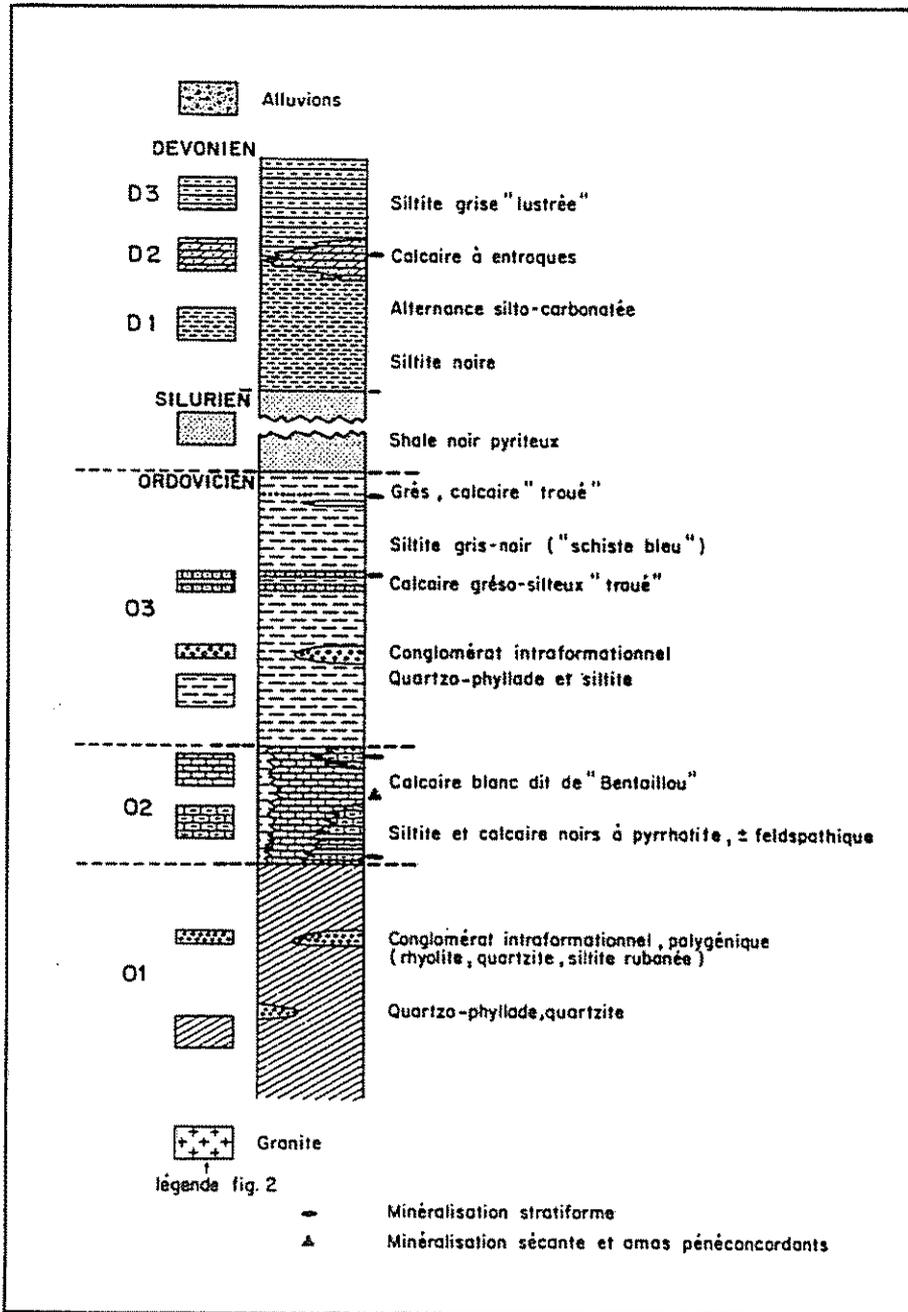


Fig. 3. - Lithostratigraphie du Paléozoïque du dôme de Bosost.

variable) est un calcaire blanc avec parfois des niveaux de calcschistes (membre O2a ou « calcaire de Bentailou »). Il lui est associé, surtout à sa base, un faciès noir de calcaires et siltites, parfois feldspathique, très dur, riche en sulfures, surtout pyrite et pyrrhotite (membre O2b ou « pseudo-carburé » ; cf. infra). Dans la montagne d'Artignan, ce faciès, particulièrement bien développé, passe latéralement et progressivement aux quartzites habituels de l'unité O1. Toute l'unité O2 est localement minéralisée sous forme de filons et d'amas pénécordants ou de niveaux stratiformes au sommet (mine de Bentailou proprement dit) à sulfures, carbonates roux Fe-Mg et souvent magnétite.

— L'unité supérieure O3 (au maximum 400 m, mais souvent moins), est semblable à l'unité O1 mais avec plus de siltites, en particulier vers le sommet où elles sont noires. Il existe aussi des conglomérats intraformationnels, avec à nouveau du matériel rhyolitique mais en

outre des galets de calcaire. Vers les deux-tiers supérieurs, sous les siltites noires, il existe un niveau repère typique, presque continu, de calcschistes, puissants en moyenne de 5 à 10 m (« calcaire troué »). C'est le seul niveau ordovicien à macrofaune abondante, ce qui a permis de le dater de l'Asghill ou au moins de l'Ordovicien supérieur. Ce niveau est souvent minéralisé en Zn-Pb ; en outre, le sommet de l'unité O3 contient aussi souvent des minéralisations stratiformes importantes à Zn-Pb, comme à Liat et la Fourcaye.

Les shales noirs siluriens, souvent riches en pyrite et avec de l'andalousite, ont une puissance de l'ordre de 200 m. Bien que souvent plissotés, ils sont généralement moins déformés et plus réguliers que dans beaucoup d'autres secteurs des Pyrénées.

Dans le Dévonien sus-jacent, on peut distinguer aussi 3 unités :

— L'unité inférieure D1 est constituée de siltites de couleur grise à noire, avec plus ou moins d'intercalations carbonatées surtout vers le sommet. Leur puissance est de 100 à 200 m.

— L'unité moyenne D2 est une barre de calcaire à entroques et calcschistes (quelques dizaines de mètres à plus de 100 m). Cette première barre carbonatée massive blanche est datée Emsien (G. Végas, 1982), comme c'est le cas souvent dans les Pyrénées. Elle contient localement une dissémination stratiforme de Zn-Pb.

— L'unité supérieure D3, enfin, est constituée de siltites grises à aspect lustré avec quelques bancs de roches carbonatées.

Il faut noter, d'une part, que la base du Cambro (?) - Ordovicien n'est pas connue et, d'autre part, qu'il existe de notables variations de puissance et de faciès des séries. C'est le cas en particulier du calcaire de Bentailou (unité O2a) qui n'existe qu'à l'est du dôme de Bosost ; à l'ouest, l'Ordovicien est représenté par une série compréhensive de quartzites et de siltites avec des intercalations nombreuses de conglomérats, mais avec presque toujours le niveau de « calcaire troué » Asghill vers le sommet. Les minéralisations Zn-Pb sont alors associées soit à ces calcschistes Asghill, soit à des conglomérats (modèle Pale de Rase ; G. Pouit, 1978). De même, le Dévonien passe localement vers le nord à un faciès épais de siltites et de calcaires noirs plus ou moins feldspathiques, riches en sulfures, analogue au faciès « Nerbiou », déjà décrit dans certains secteurs des dômes de Pierrefitte (G. Pouit *et al.*, 1979) et de Lys Caillaouas (C. Braux *et al.*, 1979). Nous reviendrons plus en détail sur ces variations au sujet de la paléogéographie du dôme de Bosost.

1.2. Le faciès noir (O2b, « pseudo-carburé »)

Bien individualisé par J.-P. Destombes, ce faciès noir, très dur, dense et riche en sulfures (jusqu'à 10 %) est associé au calcaire de Bentailou et situé le plus souvent à la base (Bentailou), plus rarement au sommet (Artignan) ou au sein même de la formation (Bulard). Il se compose de siltites et calcaires à matière organique (graphite). Ces roches peuvent devenir très riches en zoisite, minéraux de titane (lits de sphène), tourmaline, parfois biotite et surtout feldspaths calciques (bytownite à anorthite) qui peuvent constituer les 3/4 de la roche. Les sulfures sont disséminés ou se présentent en lits ou amygdales massives ou parfois en veinules anastomosées ; il s'agit presque toujours de pyrite et de pyrrotite avec des mouches de chalcopryrite et parfois du mispickel, de la blende et de la galène.

Ce faciès n'a pas de valeur stratigraphique mais il constitue un *métallotecte de première importance* dans les Pyrénées. En effet, en dehors de Bentailou, il a été observé associé à différents niveaux minéralisés du Paléozoïque des Pyrénées : Asghill du dôme de Bosost, partie sommitale de l'Ordovicien à Liat (P. Guérin, 1979) et surtout Dévonien inférieur (faciès « anormal » du Nerbiou dans les dômes de Pierrefitte et de Lys Caillaouas (G. Pouit *et al.*, 1979).

Ce faciès a donné lieu à deux interprétations : matériel volcanique tuffacé (G. Pouit et C. Alsac, 1978) ou sédiments argileux et calciques recristallisés dans le métamorphisme (P. Brula, 1984). Cette seconde hypo-

thèse semble actuellement mieux argumentée mais n'explique pas l'étroite association de ces roches noires avec les minéralisations. Une explication, qui sera confirmée plus loin dans la description de Bentailou, peut être donnée avec l'exemple de la fosse Atlantis II, en mer Rouge (P. Guennoc *et al.*, 1984), où la minéralisation hydrothermale sédimentaire est associée à des sédiments comportant 75 % d'apports hydrothermaux. Ceci explique aussi la plus grande épaisseur des sédiments d'Atlantis II comparativement à d'autres fosses stériles, comme c'est le cas aussi du Dévonien « anormal » des Pyrénées, toujours beaucoup plus puissant que les calcschistes habituels.

1.3. Structure

L'anticlinorium de Bosost, relativement simple à l'est (coupe E, fig. 4) où il est assez plat (Mail de Bulard), est compliqué dans le détail, surtout vers l'ouest (coupes A à D, fig. 4), par de nombreuses failles ou plis-failles directionnels. Ces failles s'amortissent ou se relaient, aussi bien à l'ouest qu'à l'est, et leur trace en surface est souvent difficile à suivre compte tenu du relief et du peu de niveaux repères. A cet égard, le calcaire troué Asghill est spécialement utile pour caractériser la structure anticlinale. On note aussi un comportement variable des failles suivant la lithologie : elles produisent des décalages nets dans les quartzites et plutôt une flexuration très plissotée dans le calcaire de Bentailou.

Le jeu principal de ces failles est hercynien. Un rejeu pyrénéen est localement présent, avec une tendance chevauchante encore mal individualisée. Un jeu plus précoce synsédimentaire d'au moins certaines de ces failles se traduit par des changements importants de puissance des formations sédimentaires, en particulier du calcaire de Bentailou, à leur voisinage (par exemple à Val d'Urets, coupe E de la figure 4).

Il existe aussi des fractures à faible rejet, quelques-unes subméridiennes, bien visibles sur photos aériennes. Leur jeu est pyrénéen et leur rôle dans la paléogéographie n'est pas éclairci. On note cependant que l'une de ces fractures, parmi les plus importantes, passe à Narbonne, l'un des quartiers le mieux minéralisé de Bentailou (cf. fig. 6).

1.4. Paléogéographie

De nombreux auteurs, en particulier, S.N. Visvanath (1957), ont souligné les changements importants de puissance des séries dans le secteur de la mine de Bentailou. La cartographie détaillée de l'ensemble du dôme de Bosost a permis de mieux caractériser les grandes lignes de ces variations et de préciser la paléogéographie.

Les variations de puissance et de faciès sont particulièrement évidentes dans l'Ordovicien supérieur où l'on dispose de meilleurs niveaux repères. C'est le cas en particulier du calcaire de Bentailou (unité O2) dont les variations de puissance sont particulièrement évidentes sur les deux flancs du Mail de Bulard (fig. 2) : puissant en moyenne d'une centaine de mètres, il peut s'épaissir brutalement à plusieurs centaines de mètres ou s'amincir progressivement à quelques dizaines vers le sud, près de la faille d'Urets. Au-delà de cette faille, dans les falaises d'Urets, on peut observer un épaississement brutal en doigts de gant du calcaire. Au nord d'Arti-

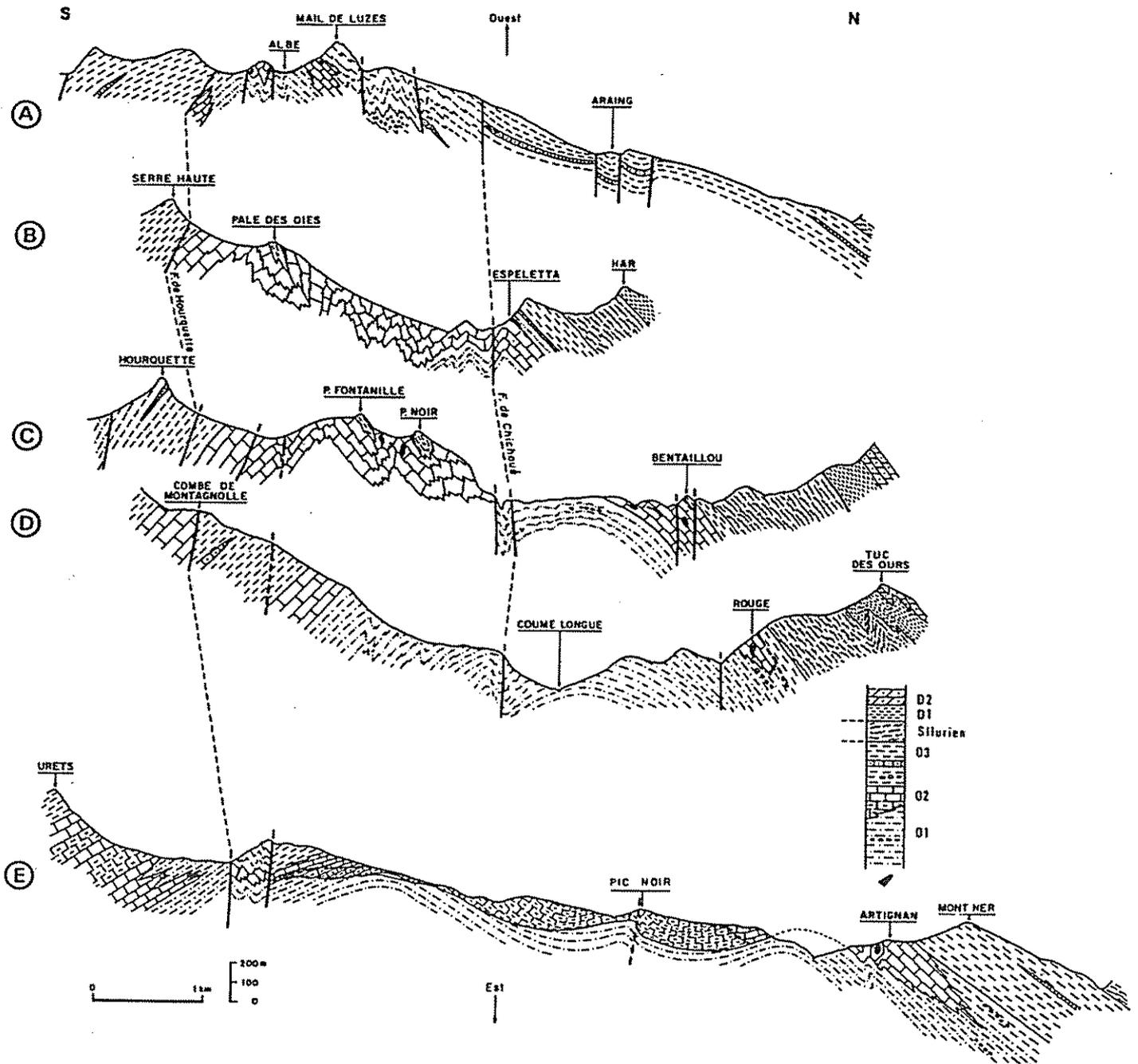


Fig. 4. - Coupes interprétatives séries de la zone orientale du dôme de Bosost entre le lac d'Araing et le Mail de Bulard (localisation : cf. fig. 2).

gnan, le calcaire de Bentaillou s'amincit progressivement après une zone de flexure puis disparaît complètement (coupe E, fig. 4). Ces variations affectent aussi les siltites et calcaires noirs associés à ce calcaire, avec souvent des passages latéraux rapides des deux faciès.

A Bentaillou, on retrouve ces variations de puissance et de faciès d'est en ouest. En outre, les sondages en mine ont montré la disparition en doigts de gant du calcaire de Bentaillou vers le nord, dans le quartier de Rouge (C. Lévy et J.P. Prouhet, 1960). Cette morphologie du calcaire de Bentaillou évoque, à juste titre, pour les auteurs, une structure subrécifale, mais qui n'a pu être confirmée par d'autres arguments (cf. fig. 7).

Une des structures paléogéographiques les plus spectaculaires est celle du site minéralisé de Bentaillou. L'unité supérieure O3 qui coiffe le calcaire minéralisé, puissante de plusieurs centaines de mètres à l'ouest (elle peut atteindre plus de 400 m, comme au Mail de Bulard), s'amincit progressivement, au droit de Bentaillou et Rouge, à environ 20 m (coupe A à D, fig. 4). On notera que, corrélativement, le calcaire troué Asghill, puissant habituellement de 5 à 10 m, s'amincit vers Rouge où il n'en subsiste plus que de minces intercalations décimétriques discontinues. De même, la lithologie de l'unité O3 varie d'ouest en est en donnant des faciès plus fins, avec des microconglomérats ou des grauwakes plutôt que des conglomérats.

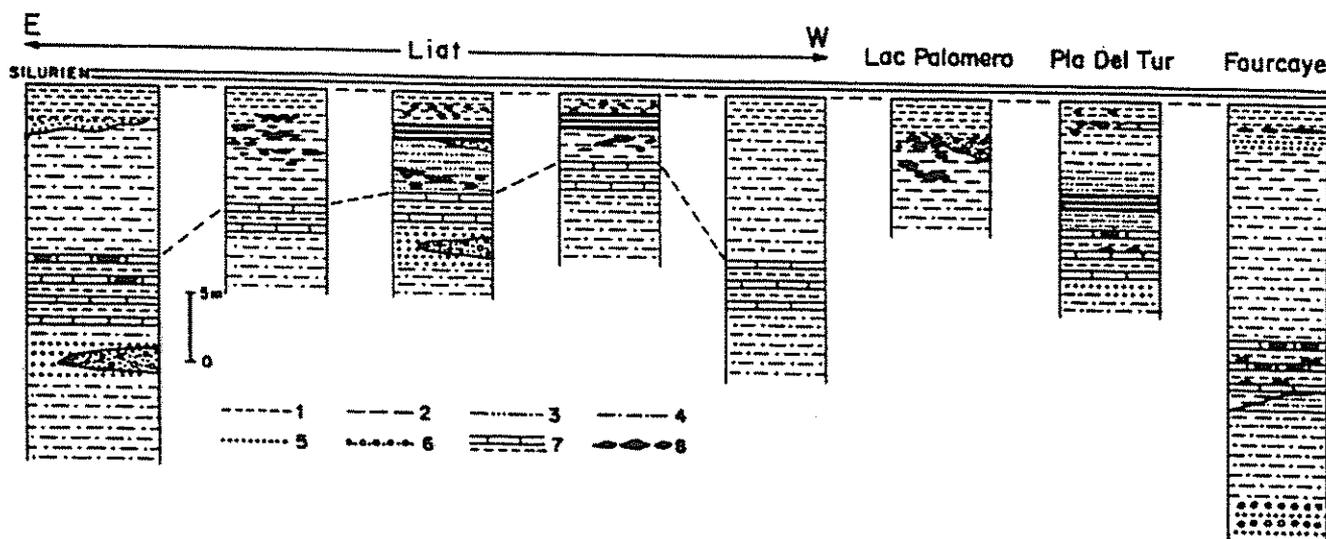


Fig. 5. - Série condensée de l'Ordovicien supérieur sur la bordure sud de l'anticlinorium de Bosost (d'après P. Guérin, 1979 et Y. Vernhet, 1981).
 1 : shales ; 2 : siltites ; 3 : siltites vertes ; 4 : siltites quartzzeuses ; 5 : grès et microconglomérats ; 6 : conglomérats ; 7 : calcaire troué ; 8 : minéralisation Zn-Pb.

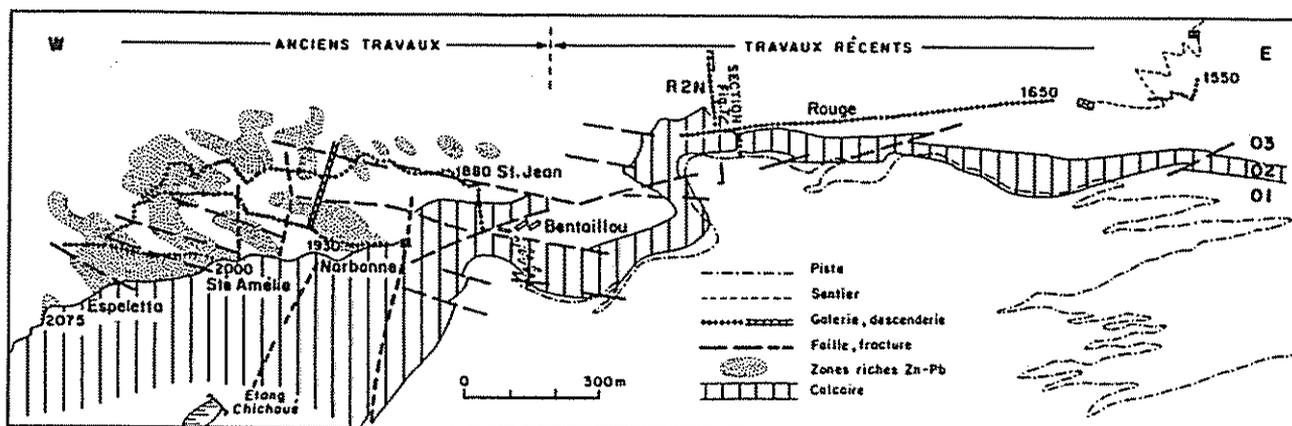


Fig. 6. - Travaux miniers de Bentaillou — Rouge, avec approximativement la zone riche en Zn-Pb (d'après C. Lévy et J.P. Prouhet, 1960 ; D. Fert, 1976 ; Destombes, Lougnon et Prouhet, doc. inédits, 1955).

Ainsi, la minéralisation de Bentaillou se localise sur un haut-fond, au sommet d'un calcaire montrant une morphologie récifale et coiffé par une unité supérieure de puissance très réduite. Il faut remarquer que d'autres niveaux minéralisés situés au sommet de l'unité O3, comme à Liat (P. Guérin, 1979) et Fourcaye (Y. Vernhet, 1981), se localisent aussi sur des hauts-fonds ou les niveaux ordoviciens supérieurs à l'Ashgill ont moins de 10 m de puissance (fig. 5).

Ces hauts-fonds sont en relation avec un environnement sédimentaire instable, attesté par les nombreux conglomérats lenticulaires intraformationnels de l'Ordovicien. Les conglomérats de l'unité O3 contiennent des galets calcaires de O2, parfois abondants comme dans le ravin de Tartereau (comm. orale A. Autran), ce qui indique des soulèvements et érosions des calcaires déposés antérieurement. En revanche, on ne connaît pas de manifestations d'un volcanisme effusif dans l'Ordovicien qui aurait pu fournir le matériel rhyolitique presque toujours présent et parfois abondant dans les conglomérats (galets et, surtout, quartz rhyolitiques). Ce phénomène est général dans les Pyrénées, excepté à Pierrefitte (J.P. Bois et G. Pouit, 1976) où il existe des intercala-

tions de rhyolites dans l'Ordovicien inférieur et beaucoup de conglomérats à galets de rhyolites dans l'Ordovicien supérieur (1). On peut donc supposer que s'il existait quelques manifestations volcaniques locales dans l'Ordovicien, mises en place à la faveur de l'instabilité tectonique synsédimentaire, elles étaient de faible dimension et ont été détruites et remaniées peu après leur dépôt.

Comme nous l'avons vu plus haut, des variations de puissance et de faciès sont aussi présentes dans le Dévonien. Ainsi, dans la profonde combe au nord du lac d'Araing, on observe le début du passage latéral des calcschistes dévoniens au faciès plus puissant de siltites et calcaires noirs (faciès Nerbiou). En général, le changement de faciès apparaît près de grandes failles directionnelles : il traduit donc ainsi probablement une instabilité synsédimentaire pendant le Dévonien.

(1) C'est, entre autres, la raison pour laquelle la minéralisation de Pierrefitte, située au sommet de l'Ordovicien, n'est pas en relation avec les rhyolites et n'appartient pas, outre de nombreux autres caractères différents, au modèle Kuroko, contrairement à l'opinion de G. Dagallier (1973, 1981) et de A.-J. Bernard et al. (1981).

En résumé, l'histoire du Paléozoïque du dôme de Bosost est dominé par l'existence d'une tectonique synsédimentaire, surtout à l'Ordovicien supérieur le mieux minéralisé (unités O2 et O3). A cette instabilité pouvait être associé localement un faible volcanisme dont il ne reste que des témoins dans les conglomérats. Cette instabilité se traduit par une paléogéographie complexe et certaines minéralisations se localisent préférentiellement sur des hauts-fonds et sont associées, à Bentaillou, à des calcaires à morphologie sub-récifale. Comme dans la région de Luchon (J.P. André, 1979), les dépôts ordoviciens semblent caractériser un milieu peu profond mais subsident compte tenu de la puissance des séries. Cette instabilité se poursuit au Dévonien avec localement des dépôts noirs anormaux pouvant résulter d'un mélange de sédiments normaux et de sédiments hydrothermaux. Si la mine de Bentaillou constitue la principale minéralisation de la partie française du dôme de Bosost, il existe d'autres niveaux minéralisés dans l'Ordovicien (Liat et Fourcaye en Espagne) mais aussi dans le Dévonien.

2. Minéralisation Zn-Pb de Bentaillou

Bien qu'il existe plusieurs dizaines d'indices dans le calcaire de Bentaillou, les plus importants ayant fait l'objet de travaux miniers et parfois de petites exploitations, la mine de Bentaillou (connue aussi sous le nom de Sentein) est de loin la plus importante puisqu'elle a produit entre 1853 et 1954 (avec des interruptions) environ 1 Mt de tout-venant contenant 120 000 t de Zn-Pb (teneur moyenne de 12 % et ratio Zn/Pb moyen de 3).

Une minéralisation discontinue jalonne le contact du calcaire de Bentaillou et de l'unité schisteuse O3, depuis la cote 1 550 à l'est jusqu'à 2 075 à l'ouest, soit sur une dénivelée de 525 m et une longueur de plus de 2,5 km (fig. 6). La totalité de la production a été fournie par les anciens travaux occidentaux qui s'étendent sur 1 km de long et 3 à 400 m de large, avec d'ouest en est les quartiers d'Espeletta, Sainte-Amélie, Narbonne et

Saint-Jean. Après 1954, des travaux de recherches (galeries et sondages fond) ont été effectués à l'est (quartier de Rouge) dans le cadre d'un syndicat regroupant la Société des mines de Bentaillou, la Société minière et métallurgique de Peñarroya (SMMP) et le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM). Ces travaux ont permis la découverte de nouvelles lentilles minéralisées, en partie cachées, dans ce quartier (fig. 7).

La minéralisation stratiforme se présente en gros comme un run E-W, avec des lentilles plurihectométriques riches, séparées par des zones quasi stériles ou pauvres. Ce run, long de près de 3 km et large de 3 à 400 m, est pris en écharpe par la topographie. Il est affecté de failles ou flexures hercyniennes E-W à WNW-ESE, à faible rejet (10 à 20 m), qui s'amortissent et se relaient longitudinalement, ainsi que de fractures sub-méridiennes sans ou avec un faible rejet (quelques mètres), en particulier dans le quartier de Narbonne.

Dans le détail, la morphologie exacte de la minéralisation est mal connue et difficile à étudier (vieux travaux salis, plus ou moins accessibles, zones éboulées, importantes zones défilées). Nous insisterons ici sur trois aspects permettant des comparaisons avec les autres minéralisations du Paléozoïque des Pyrénées, la caractérisation du type Bentaillou et les processus de son dépôt.

2.1. Morphologie de la minéralisation stratiforme

Elle est complexe et variable dans le détail ; la figure 8 en donne deux exemples assez représentatifs à différentes échelles. Sur plusieurs mètres de puissance, au sommet du calcaire de Bentaillou jusqu'au contact avec les schistes O3, on observe une série d'intercalations lenticulaires métriques à plurimétriques, plus ou moins concordantes, de cherts chloriteux noirs et de dolomies ferrifères rousses riches en amphiboles (trémolite - actinote) en gerbes. La minéralisation à blende dominante, parfois galène, localement chalcopryrite et parfois pyrite et pyrrhotite assez abondantes, est disséminée ou en amas et rubans massifs discontinus. Elle peut devenir massive (essentiellement la blende) avec une puissance de 0,5 à 1 m.

Même s'il existe parfois des rubans de sulfures ou une dissémination conforme à la stratigraphie des calcaires, les minerais ont rarement un aspect sédimentaire. Cette morphologie complexe a été accentuée par la tectonique, avec en particulier des boudinages dans des roches de compétence différente, et par la recristallisation des gangues et des sulfures ; elle est aussi primaire, car on la retrouve dans des panneaux peu ou pas déformés.

2.2. Altérations et minéralisations séchantes du mur

Toute la barre calcaire de Bentaillou, dans la zone coiffée par la minéralisation stratiforme, est plus ou moins minéralisée, avec des stockwerks et de gros amas discordants ou pénécordants, certains hectométriques, avec plus de 10 m de puissance. Il s'agit d'amas de dolomie ferrifère rousse, à amphiboles et résille de quartz, souvent riches en magnétite et localement avec des sulfures. Le stockwerk est aussi à dolomie et quartz

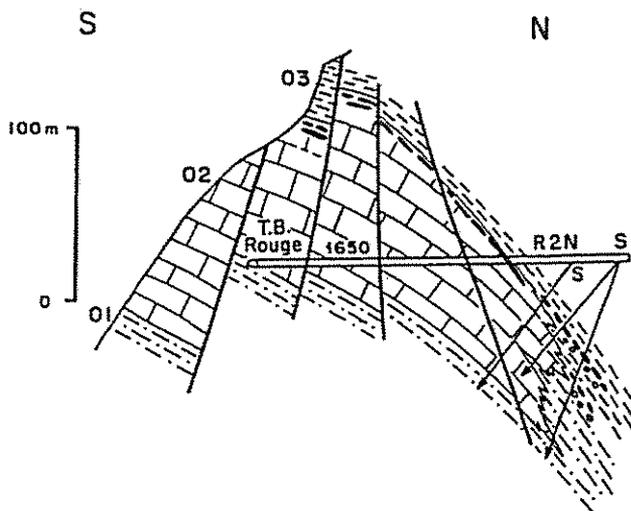


Fig. 7. - Coupe montrant la terminaison du calcaire de Bentaillou vers le nord dans le quartier de Rouge de la mine de Bentaillou (C. Lévy et J.P. Prouhet, 1960).

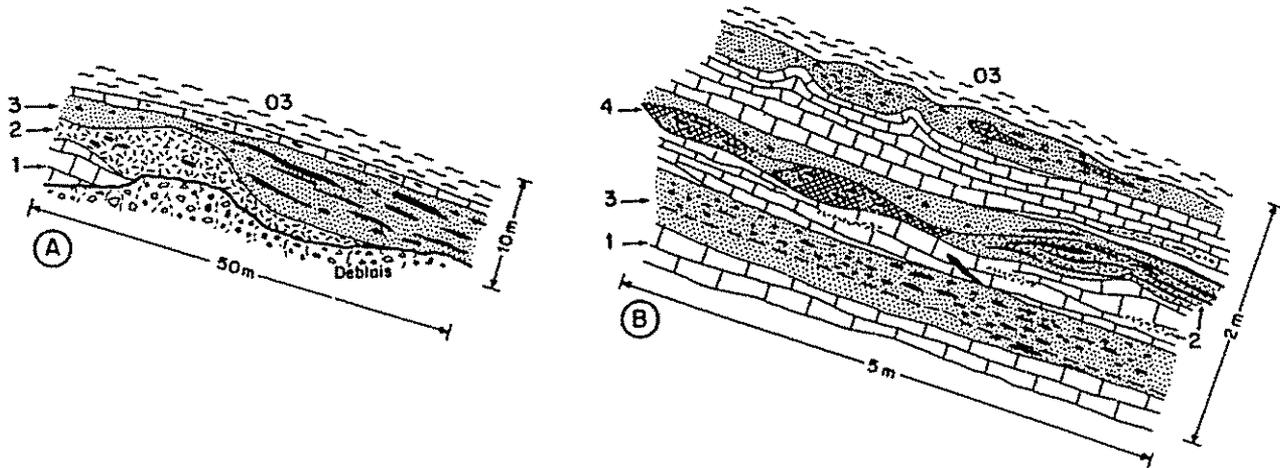


Fig. 8. - Morphologie à deux échelles différentes de la minéralisation stratiforme de Bentailou. A : Espeletta ; B : St-Jean.
1 : calcaire ; 2 : dolomie rouge ; 3 : chert noir à rubans de blende ; 4 : quartz ; O3 : schistes de l'Ordovicien supérieur.

avec parfois de la séricite abondante. Au voisinage de ces minéralisations discordantes, le calcaire est imprégné de chlorite et contient parfois de nombreux quartz ronds qui sont d'ailleurs aussi présents dans les cherts de la minéralisation stratiforme et les minerais à blende massive.

Ces minéralisations discordantes à pénéconcordantes semblent surtout abondantes à la verticale de l'axe du run stratiforme, comme on peut l'observer sous les bâtiments de Bentailou (fig. 9) et sous le quartier de Rouge, à l'affleurement et en galerie. Plus généralement, elles constituent régionalement le type morphologique le plus fréquent dans le calcaire de Bentailou où elles peuvent prendre un développement important comme à Albe, Artignan et Bularic. En particulier, la structure Artignan-Bularic, soit sur 1,2 km de long de part et d'autre de l'arête du Mail de Bulard (fig. 2), est jalonnée de filons discontinus et amas pénéconcordants dont l'enveloppe va du mur au toit du calcaire. Coiffant cette structure, une minéralisation stratiforme étroite est présente au contact de l'unité-O3, associée à des couches de magnétite. Une structure analogue est présente plus au sud, près du Pic Noir.

Il est important de souligner que ces minéralisations discordantes sont affectées par la déformation, en particulier les stockwerks qui sont plissotés (fig. 10 A) et, en restant sécants, sur la stratigraphie, sont affectés par des plis métriques (fig. 10 B). En revanche, les amas plus massifs, recristallisés, ont servi de noyaux résistants qui ont subi surtout un boudinage et sur lesquels les déformations plastiques du calcaire sont venues se mouler.

On retrouve ici un caractère général des minéralisations Zn-Pb de l'Ordovicien des Pyrénées, à savoir une association plus ou moins étroite d'un niveau minéralisé concordant et, au mur, de minéralisations discordantes déformées, attestant de leur mise en place précoce. Ce caractère a été bien décrit à Pierrefitte (J.P. Bois et G. Pouit, 1976) où il existe d'importants filons exploités (Estaing, Garaoulère, etc.), perpendiculaires à la stratigraphie mais déformés et localement transposés dans la schistosité. C'est aussi le cas du modèle Pale de Rase

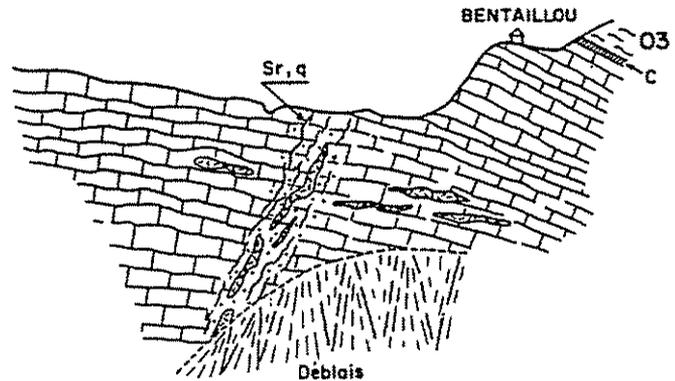


Fig. 9. - Stockwerk à quartz, chlorite, séricite (Sr, q) et amas discordants et pénéconcordants de dolomie rouge ferrifère dans le calcaire de Bentailou au mur du run minéralisé (C).

(G. Pouit, 1978) où les conglomérats, au mur de la minéralisation stratiforme, contiennent des filons ou veines plissées de blende (fig. 11).

2.3. Minéralogie des minerais et gangues

Les minéralisations concordantes et sécantes sont caractérisées par une association de minéraux majeurs et traces identique (E. Oudin, 1982 ; E. Oudin *et al.*, 1985) et l'abondance de la gangue associée. Ces caractères sont généraux des minéralisations du Paléozoïque des Pyrénées, y compris celles dans la zone espagnole du dôme de Bosost (E. Cardellach *et al.*, 1982).

Les *minéraux majeurs* sont la blende et la galène, avec parfois des traces de chalcopirite et de la pyrrhotite et de la pyrite qui peuvent devenir localement abondantes, dans la zone de Rouge en particulier. La magnétite est parfois largement représentée, surtout dans les amas pénéconcordants où elle peut être associée à la pyrrhotite et au mispickel (avec Au). Les oxydes de titane sont toujours fréquents.

Les *minéraux traces*, comme dans l'ensemble des Pyrénées, sont le cuivre gris, des sulfosels, des minéraux

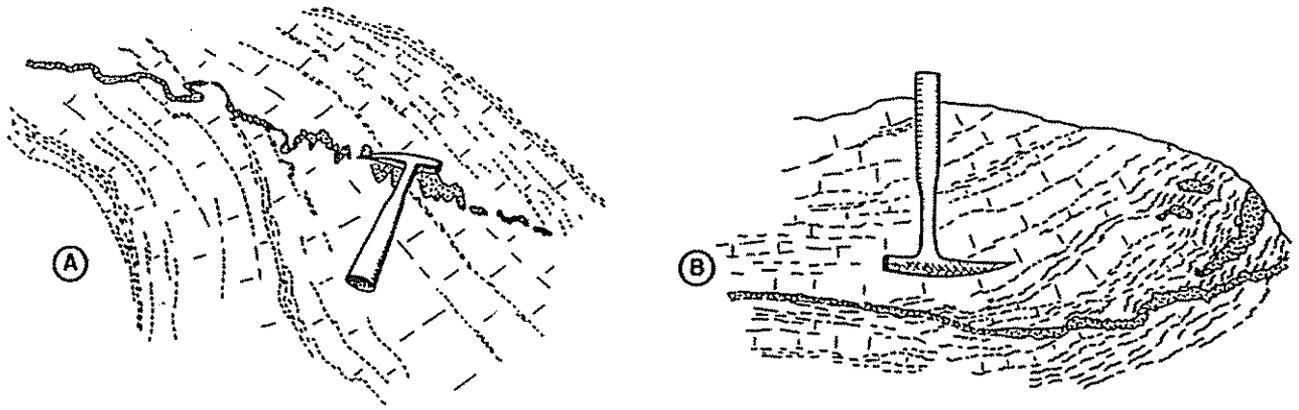


Fig. 10. - Veinules plissotées de dolomie rousse ferrifère, avec parfois quartz, séricite, sulfures, chlorite (A), reprises dans des plis métriques (B), encaissées dans le calcaire à niveaux silteux de Bentailou (dessins d'après photographies).

d'argent, de nickel-cobalt (gersdorffite, ullmanite, nickéline, pentlandite) et de germanium (brunogéirite). D'autres minéraux de Ge et Ga ainsi que de Sn (cassitérite, stannite), fréquents dans d'autres indices du dôme de Bosost (Liat, Bulard,...), n'ont pas été observés à Bentailou.

Les gangues sont caractérisées surtout par la silice, les carbonates Fe-Mg et les silicates (sericite, chlorite sombre, amphiboles). Dans la minéralisation de Bentailou, l'expression de cette gangue est stratiforme, interstratifiée avec des calcaires et calcschistes. Elle est surtout constituée de quartzites noirs, fins, plus ou moins chloriteux, et de carbonates Fe-Mg roux, riches en amphiboles (trémolite-actinote, cummingtonite, grunerite). Les quartzites sont microcristallins, avec des amandes de quartz recristallisé. Ils montrent des structures rubanées à fluidales ou massives et contiennent plus ou moins de chlorite, un peu de carbonates fins et, par taches, des quartz ronds à bordure nourrie qui ne semblent pas d'origine détritique. Ce sont surtout ces quartzites, probablement d'anciens cherts, qui contiennent de la blende disséminée ou en rubans massifs. Au sommet du calcaire, dans la base des schistes O3, il existe souvent des niveaux de séricitites riches en tourmalines néoformées traduisant probablement une altération borée, avec des traces de blende dans le litage. Enfin, l'apatite peut être localement abondante.

Dans les minéralisations sécantes, la gangue est surtout carbonatée, avec des amphiboles, de la chlorite et du quartz blanc mais aussi, parfois, des quartzites noirs ainsi que des séricitites.

En résumé, la minéralisation stratiforme de Bentailou se présente en un E-W mais dans lequel les lentilles riches sont discontinues. Elle est associée, à son tour, à des minéralisations discordantes ou pénécordantes et des altérations à silice, séricite et carbonates Fe-Mg. Elle est constituée de sulfures, à blende dominante, associés à une gangue abondante dont les compositions et la minéralogie sont identiques à celles des autres minéralisations du Paléozoïque des Pyrénées. L'ensemble de ces minéralisations concordantes et discordantes ont été affectées par le métamorphisme et la tectonique qui produisent des recristallisations et la néoformation de minéraux mais pas de remobilisations notables. La

coupe de la figure 7 montre enfin que la minéralisation se prolonge dans les schistes lorsque le calcaire passe latéralement à des brèches à galets calcaires puis à des quartzites : elle marque donc une époque de sédimentation en cours plutôt qu'un contact lithologique. Tous ces caractères sont typiques des minéralisations hydrothermales (ou exhalatives) sédimentaires.

3. Les autres minéralisations du dôme de Bosost

Les conclusions tirées de l'étude de la minéralisation de Bentailou peuvent être éclairées par des observations concernant d'autres minéralisations dans le dôme de Bosost, soit dans le calcaire de Bentailou, soit dans d'autres niveaux minéralisés.

3.1. Autres minéralisations dans le calcaire de Bentailou

Elles sont fréquentes et se présentent surtout sous forme d'amas discordants ou pénécordants dans le calcaire : Albe, Pale des Oies, Pic Noir, Serre Haute, Pic de Past et surtout Montagne d'Artignan et Bularic sur les deux flancs du Mail de Bulard (fig. 2 et 4). Elles sont surtout minéralisées en fer (pyrrhotite, magnétite et carbonates ferrugineux) avec, localement, de la blende (Artignan, Bularic-Haut) et aussi de l'or qui est visible au microscope : un échantillonnage sur un amas plurimétrique à la base du calcaire de Bentailou donne une teneur de 10 g/t Au.

A ces amas discordants peuvent être associés parfois des niveaux stratiformes au sommet du calcaire de Bentailou : Pic Noir et surtout la structure Artignan-Bularic. Ces niveaux semblent être peu étendus et sporadiques. Ils contiennent, comme les amas discordants, beaucoup de magnétite et de carbonates Fe-Mg mais peu ou pas de cherts noirs. Corrélativement et contrairement à Bentailou, ils ne se situent pas sur un haut-fond : à Artignan et Bularic, le calcaire est toujours présent mais avec une puissance variable et l'unité supérieure O3 a

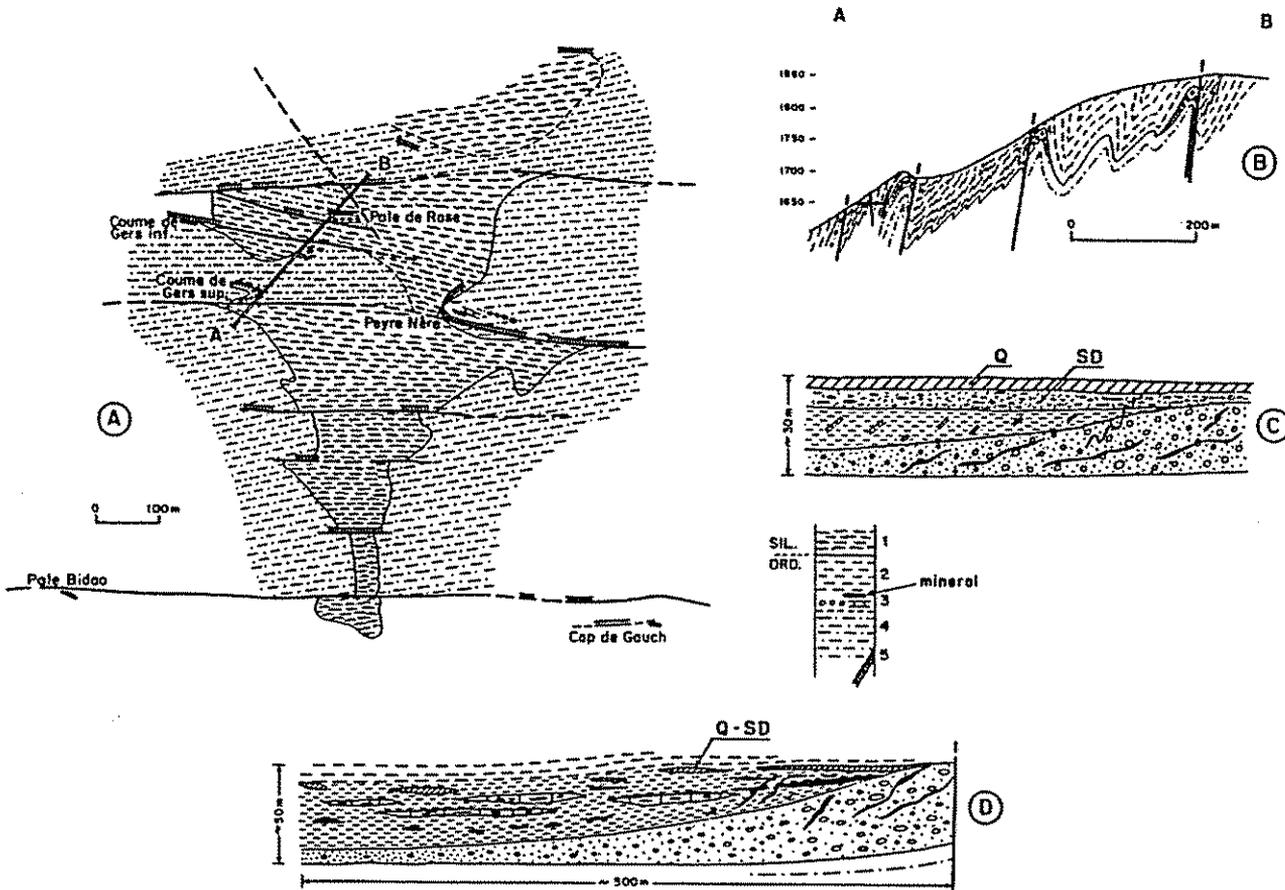


Fig. 11. - Carte géologique (A), coupe (B) et minéralisation (C) de Pale de Rase. En D, reconstitution d'après les caractères d'autres indices du modèle type Pale de Rase.
 Q : quartz ; SD : sidérite ; 1 : shales noirs siluriens ; 2 : siltites ; 3 : calcaires et conglomérats ; 4 : quartzites ; 5 : dykes de rhyolite.

une puissance de plusieurs centaines de mètres. On remarque cependant que ces minéralisations se localisent sur des zones de flexures se traduisant par de nombreux plis plastiques et des variations latérales de puissance du calcaire de Bentaillou (rejeu probable d'une ancienne structure synsédimentaire).

3.2. Les minéralisations associées à des conglomérats

Lorsque le calcaire de Bentaillou n'existe plus (ouest du lac d'Araing), la minéralisation Zn-Pb dans l'Ordovicien est souvent associée à des conglomérats lenticulaires et localisée près ou au contact des failles directionnelles E-W. Ces conglomérats sont à galets abondants de rhyolite (Pale de Rase, Barguerasses, Fos et nombreux autres indices ; fig. 1) et de calcaire (Argut). Certaines de ces lentilles constituent probablement un équivalent latéral du calcaire de Bentaillou, ce dernier étant souvent encadré de conglomérats lorsqu'il s'aminuit et disparaît (Est de Rouge, Sud d'Artignan). Il est certain cependant qu'il existe plusieurs niveaux de conglomérats minéralisés, certains proches du contact avec le Silurien, comme à Argut.

Les minéralisations du secteur de Pale de Rase (fig. 11 A), situées à une dizaine de kilomètres au nord-ouest de Bentaillou, permettent de reconstituer (G. Pouit, 1978)

le modèle typique des minéralisations associées aux lentilles conglomératiques (fig. 11 D). Ce sont près ou au contact de grandes failles directionnelles qui ont rejoué à l'hercynien en plis-failles jalonnés de rhyolites (2), que se localisent les conglomérats lenticulaires minéralisés passant latéralement à des microconglomérats, des grauwackes et des siltites noirs avec intercalations carbonatées parfois lumachelliques. Des minéralisations stratiformes sont associées à des veines et filons plissés situées dans les conglomérats du mur. L'association minéralogique ainsi que les gangues abondantes (silice, carbonates Fe-Mg roux, séricite, chlorite) sont identiques à celles observées à Bentaillou et dans l'ensemble du Paléozoïque des Pyrénées, avec cependant moins d'amphibole en raison d'un métamorphisme moins élevé.

Les minéralisations de Liat (P. Guérin, 1979) et Fourcaye (Y. Vernhet, 1981), associées à des siltites noires, des calcaires et des microconglomérats, à proximité de failles E-W (fig. 2), appartiennent probablement à un modèle semblable à celui de Pale de Rase. Elles sont cependant bien plus importantes et l'on remarque,

(2) Les rhyolites de Pale de Rase décrites par E. Raguin (1946) sont des dykes hercyniens. Elles jalonnent des failles à rejeu hercynien mais, dans certains cas, leur mise en place dans la tectonique hercynienne peut être précoce, si bien qu'elles peuvent être plissées tout en restant sécantes sur la stratigraphie comme à Peyre Nère (fig. 11 A).

comme à Bentaillou, qu'elles se situent sur un haut-fond avec une série Ordovicien supérieur O3 réduite à quelques dizaines de mètres.

Nous soulignerons ici qu'en dépit d'environnements lithologiques différents de celui de Bentaillou, trois caractères fondamentaux identiques sont présents : site paléogéographique particulier en relation avec une instabilité synsédimentaire, association de minéralisations concordantes et discordantes au mur, même association minéralogique et mêmes gangues hydrothermales abondantes.

3.3. Les minéralisations dans le calcaire troué Asghill

Ce niveau mince (5 à 10 m), presque toujours présent dans le dôme de Bosost, contient de nombreux indices de Zn-Pb. Constitué d'une fine alternance de siltites et de calcaires, il est associé (à sa base et latéralement) à des siltites et des calcaires noirs plus ou moins feldspathiques (type faciès Nerbiou) avec des sulfures (pyrite, pyrrhotite, traces de chalcopryrite et parfois blende et galène). A son sommet, on observe régionalement des niveaux siliceux microcristallins plus ou moins fluidaux (cherts) associés à des lits de chloritites et surtout de séricitites à tourmaline, pyrrhotite et pyrite. Enfin, les faciès carbonatés sont souvent riches en débris de fossiles (lumachelles).

Les principales minéralisations se localisent à l'intersection de ce niveau avec les failles directionnelles E-W. A Uls, le calcaire troué s'épaissit à plusieurs dizaines de mètres sur un des bords d'une telle faille et contient une minéralisation Zn-Pb sécante à péneconcordante, déformée par des plis (G. Pouit, 1978). A Crabère, la minéralisation Zn-Pb présente le même aspect dans un calcaire plus épais ; une recoupe de 350 m n'a pas rencontré l'aval de cette minéralisation interrompue par une faille mais a intersecté, à 65 m de l'entrée, un filon de blende dans les quartzites noirs du mur du calcaire. Au lac d'Araing, le calcaire troué est minéralisé près de failles avec des traces de chalcopryrite, galène, pyrrhotite et surtout du mispickel. La minéralisation est associée à des niveaux siliceux chertueux et des tourmalinites sériciteuses ; au mur, on observe des filons plissés de quartz. Ces observations rendent compte d'un phénomène hydrothermal (ou exhalatif) siliceux et boré, presque régional à la période Asghill, plus intense près de failles directionnelles E-W où se manifeste aussi une paléogéographie particulière (petits bassins avec une sédimentation plus épaisse). Ce phénomène est aussi connu dans le Dévonien d'Arre et Anglas, à l'ouest du dôme de Pierrefitte, où il existe des niveaux de lumachelles avec Zn-Pb bien développés régionalement et des manifestations hydrothermales de chloritites à magnétite. Signalons qu'une paléogéographie analogue a été observée au Yukon (Canada) pour des niveaux hydrothermaux sédimentaires de barytine qui deviennent beaucoup plus épais près des failles (R.C. Carne et R.J. Cathro, 1982). On notera aussi la présence de lumachelles associées aux niveaux minéralisés, traduisant probablement l'existence d'une oasis de vie installée à la faveur des manifestations hydrothermales sous-marines, comme c'est le cas actuellement sur la ride Est Pacifique.

Au Mail de Bulard, dans les falaises à l'est de l'arête, il existe une ancienne mine qui a produit au moins

50 000 t de minerai riche (plus de 10 % Zn + Pb). Elle n'a pas été étudiée car elle est actuellement très difficile d'accès. Elle est décrite comme un filon mais semble aussi plus ou moins associée au calcaire troué Asghill. Il est possible que cette minéralisation soit analogue à celle de Crabère, avec des filons dans les quartzites et des stockwerks péneconcordants dans le calcaire troué.

En conclusion, on soulignera l'existence de plusieurs niveaux porteurs dans l'Ordovicien, toujours associés à des environnements sédimentaires instables mais qui se manifestent différemment dans la lithologie et la paléogéographie. Toutes ces minéralisations sont affectées par la déformation et le métamorphisme ; elles ont la même association minéralogique et les mêmes gangues et montrent souvent une association de minéralisations concordantes et sécantes. Au Dévonien, il existe aussi de petits indices dans la première barre carbonatée (D 2), comme c'est le cas fréquent dans les Pyrénées. Ces indices sont relativement plus importants à Baren (fig. 1) où ils contiennent la même association minéralogique et les mêmes gangues que ceux de l'Ordovicien (G. Végas, 1982).

Discussion et conclusion

Bien que résultant d'un processus de dépôt hydrothermal et sédimentaire semblable, les amas sulfurés stratiformes se rapportent à deux types (G. Pouit, 1976, 1984, 1985 ; R.W. Hutchinson, 1980, W. Klau et D.E. Large, 1980) :

— type I, ou amas sulfuré s.s., associé soit au volcanisme océanique basique (modèle Chypre), soit à la phase acide d'un volcanisme bimodal souvent d'arc insulaire (modèle Kuroko) ;

— type II, ou sédex (sedimentary-exhalative ; R.C. Carne et R.J. Cathro, 1982), associé à des sédiments de nature variée, déposés dans des zones instables en tension (rift, limite de bassin et de plate-forme,...).

Ces deux types présentant des caractères fondamentaux semblables mais, outre leur cadre géodynamique différent, montrent des caractères spécifiques qui permettent de les distinguer, bien que les limites ne soient pas parfaitement tranchées (G. Pouit, 1984 ; D.E. Large, 1980) :

— environnement instable en tension qui se traduit, dans le type II, par des variations de puissance et de faciès dans une paléogéographie complexe et, contrairement au type I, des modèles variés ;

— association plus ou moins étroite de minéralisations concordantes et discordantes (griffons), ces dernières étant associées à des altérations et, pour le type II, une morphologie traduisant l'imprégnation d'un sédiment non lithifié ;

— association du minerai à une gangue qui se traduit, dans les minéralisations concordantes, par des sédiments hydrothermaux surtout siliceux, parfois carbonatés (Fe, Mg, Mn), silicatés (séricitites, chloritites, talc), borés (tourmalinite),... ;

— existence d'une période majeure de minéralisation pour le type I mais de plusieurs, superposées pendant un long laps de temps, pour le type II (tout le Paléozoïque au Yukon, par exemple) ;

— encaissant volcanique ou, au moins, proximité d'un

volcanisme pour les minéralisations de type I ; le volcanisme peut être présent pour le type II, mais pas nécessairement (Sullivan, J.M. Hamilton *et al.*, 1982) ; lorsqu'il est présent, c'est à l'échelle de la province et les minéralisations n'ont pas obligatoirement de relations spatio-temporelles étroites avec lui.

Les minéralisations du dôme de Bosost, comme dans l'ensemble du Paléozoïque des Pyrénées, montrent les caractères généraux du type hydrothermal sédimentaire et, plus spécifiquement, du type II : présence de griffons et d'altérations, abondance des gangues, superposition de plusieurs époques de minéralisation, présence locale de volcanisme mais pas de liaison étroite obligatoire avec les minéralisations, instabilité synsédimentaire avec une paléogéographie complexe et des modèles minéralisés variés.

Parmi les problèmes qui sont plus spécifiques au dôme de Bosost, nous insisterons sur le volcanisme et surtout les modèles minéralisés dont les caractères définissent les guides de recherche. L'existence de volcanisme n'est qu'indirectement prouvé à l'Ordovicien par le matériel détritique à éléments rhyolitiques des intercalations conglomératiques. La minéralisation de modèle Pale de Rase associée à ces conglomérats, semble donc bien suivre immédiatement cette phase volcanique remaniée. En revanche, il n'existe aucune preuve de l'existence de manifestations volcaniques associées ou précédant le dépôt de la minéralisation de Bentailou.

Au sujet des modèles et de l'importance des minéralisations dans le type sédex, ils sont fonction de trois paramètres dont seuls les deux premiers ont trait au cadre géologique : paléogéographie du milieu de dépôt, relations entre griffons et pièges sédimentaires, volume et richesse des solutions hydrothermales. Les solutions hydrothermales sous-marines, généralement denses, sont piégées le plus souvent dans des bassins réducteurs (de 1^{er} à 3^e ordre, d'après D.E. Large, 1980) contrôlés par des failles. Dans ces pièges, la minéralisation est souvent importante (Mc Arthur River, Australie), surtout lorsque le griffon est centré sous des dépressions sous-marines comme à Sullivan au Canada, (J.M. Hamilton *et al.*, 1982) et Atlantis II en mer Rouge (P. Guennoc *et al.*, 1984). Toutefois, il n'en est pas toujours ainsi : l'exemple de Red Dog en Alaska (D.W. Moore et L.E. Young, 1985) montre en effet qu'un très gros gisement (plus de 77 Mt à 22 % Zn + Pb) s'est déposé sur un haut-fond, à l'émergence d'un griffon qui a fonctionné pendant au moins 20 Ma. Ici, le minerai est surtout massif et, bien que stratiforme, n'a pas un caractère bien sédimenté comme celui déposé dans des bassins.

Ce dernier cas semble bien celui des principales minéralisations du dôme de Bosost, comme Bentailou, déposées sur des hauts-fonds, proches de griffons auxquels sont associées des altérations, avec des minerais massifs stratiformes mais sans caractère bien sédimenté. C'est aussi le cas dans l'Ordovicien de Pierrefitte où le même type de minerai s'est déposé sur un haut-fond en bordure d'un horst (J.P. Bois et G. Pouit, 1976).

En revanche, les minéralisations dans l'Asghill (modèle Uls) ou associées aux conglomérats (modèle Pale de Rase) semblent bien localisées dans de petites dépressions d'effondrement près de failles synsédimentaires comportant un griffon. Pourtant ces minéralisations sont peu importantes (quelques dizaines de milliers de

tonnes) et même lorsqu'elles sont plus étendues, comme à l'Hospice de France dans le dôme de Lys Caillaouas, elles restent pauvres. Ici intervient probablement le troisième facteur concernant la richesse et le volume des solutions hydrothermales. C'est le cas aussi inexplicable en mer Rouge où seule la fosse Atlantis II contient 1 Gt de minerai, alors que la quinzaine d'autres fosses connues, parfois avec des saumures, ne contiennent que des sédiments à faible teneur.

Dans le dôme de Bosost, dont l'étude de la zone française n'est pas terminée, les modèles minéralisés ne sont qu'incomplètement cernés, ce qui empêche de discuter avec plus de précision les contrôles de la minéralisation. Il demeure par contre que le type de minéralisation est maintenant bien connu, ce qui permet de mieux orienter, dans un but scientifique et appliqué, des recherches ultérieures.

Remerciements

Nous remercions R. Moussu pour ses remarques et le soin particulier apporté à la lecture du fond et de la forme du manuscrit. Nous remercions également J. Récopé et C. Dubois pour l'abondante iconographie réalisée.

Références bibliographiques

- ANDRÉ J.-P. (1979) — Le Paléozoïque de la vallée du Lys, zone axiale des Pyrénées de Haute-Garonne : un essai d'interprétation sédimentologique. Thèse 3^e cycle, Univ. P.-et-M.-Curie, Paris VI, 348 p.
- BERNARD A.-J., DAGALLIER G., SOLER E. (1981) — The exhalative sediments linked to the volcanic massive sulphide deposit : a case history of European deposit. In Amstutz G.C. *et al.*, éd. « Ore genesis, the State of the Art », Springer Verlag, p. 553-563.
- BOIS J.-P., BERTRANEU J., BOULADON J., GUIRAUDIE C., PROUHET J.-P. (1972) — Carboire, un nouveau type de minéralisation stratiforme à Pb-Zn dans les Pyrénées françaises — 24^e C.G.I., Montréal, section IV, p. 363-372.
- BOIS J.-P., POUIT G. (1976) — Les minéralisations à Zn-(Pb) de l'anticlinorium de Pierrefitte : un exemple de gisements hydrothermaux et sédimentaires associés au volcanisme dans le Paléozoïque des Pyrénées centrales. *Bull. BRGM*, (2), sect. II, n° 6, p. 543-567.
- BRAUX C., POUIT G., ALSAC C. (1979) — Les minéralisations Zn-(Pb) stratiformes du Paléozoïque volcanosédimentaire en bordure nord du dôme de Lys Caillaouas, Hautes-Pyrénées (Val de Lustou et d'Azet). *Bull. BRGM*, (2), sect. II, n° 4, p. 323-331.
- BRULA P. (1984) — Les schistes noirs de la série paléozoïque du dôme de Bosost-Luchon (Pyrénées centrales). Thèse 3^e cycle, Univ. Cl.-Bernard, Lyon, 236 p.
- CARDELLACH E., PHILLIPS R., AYORA C. (1982) — Metamorphosed stratiform sulphides of the Liat area, Central Pyrénées, Spain. *Trans Inst. Met. Bull.*, sect. B, p. B90-94.
- CARNE R.C., CATHRO R.J. (1982) — Sedimentary exhalative (Sedex) zinc-lead-silver deposits, Northern Canadian Cordillera. *CIM Bull.*, vol. 75, n° 840, p. 66-78.
- DAGALLIER G. (1973) — Sur le cycle volcanosédimentaire de l'Ordovicien terminal à Fe-Zn-Pb de la région de Pierrefitte-Nestales. *C.R. Acad. Sci., Paris*, t. 276, p. 273-276.
- DAGALLIER G. (1981) — L'environnement volcanosédimentaire et les minéralisations Zn-Pb de l'Ordovicien terminal de Pierrefitte-Nestales. *Sciences de la Terre*, t. 24, n° 3, p. 262-266.
- FERT D. (1976) — Un aspect de la métallogénie du zinc et du plomb dans l'Ordovicien des Pyrénées centrales : le district de Sentin (Ariège). Thèse 3^e cycle, Univ. P.-et-M.-Curie, Paris VI, 135 p.
- GUENNOG P., POUIT G., NAWAB Z. (1984) — The Red Sea : history and associated mineralizations. In press, AAPG, Triassic-Jurassic Rifting : North America and North Africa, W. Manspeizer éd.
- GUÉRIN P. (1979) — Les minéralisations zincifères de l'Ordovicien de la région de Liat (Val d'Aran, province de Lerida, Espagne). Thèse 3^e cycle, Univ. P.-et-M.-Curie, Paris VI, 203 p.
- HAMILTON J.M., BISHOP D.T., MORRIN M.C., OWENS O.E. (1982) —

G. POUIT

- Geology of the Sullivan orebody, Kimberley, B.C., Canada *Geol. Assoc. Canada Spec. paper* 25, p. 567-665.
- HUTCHINSON R.W. (1980) — Massive base metal sulfides deposits on guide to tectonic evolution. *Geol. Assoc. Canada, Spec. paper* 20, p. 659-684.
- KLAU W., LARGE D.E. (1980) — Submarine exhalative Cu-Pb-Zn deposits. A discussion of their classification and metallogenesis. *Geol. Jb*, D 40, p. 13-58.
- LARGE D.E. (1980) — Geological parameters associated with the sediment-hosted, submarine exhalative Pb-Zn deposits : an empirical model for mineral exploration. *Geol. Jb*, D 40, p. 50-130.
- LÉVY C., PROUHET J.-P. (1960) — Géothermométrie du gisement plombo-zincifère de Sentein (France). 21^e C.G.I., Copenhague, part. XVI, p. 200-208.
- MOORE D.W., YOUNG L.E. (1985) — Geologic setting and genesis of the Red Dog Zn-Pb-Ag deposit, Western Brook Range, Alaska. Prelim. paper, 47 p., Symposium on the genesis of stratiform sediment hosted Pb-Zn deposits, Stanford.
- LOUDIN E. (1982) — Minéralogie des Pyrénées centrales. Annexe III, C. R. fin action concertée DGRST, 29 p.
- LOUDIN E., POUIT G., TOLLON F. (1985) — Minéralogie et zonalité des minéralisations de Pb-Zn dans la zone axiale des Pyrénées. *Bull. Soc. Fr. Minéralogie* (sous presse).
- POUIT G. (1976) — Gisement et volcanisme. *Mém. h.-série Soc. géol. France*, n° 7, p. 115-126.
- POUIT G. (1978) — Différents modèles de minéralisations hydrothermales sédimentaires à Zn-(Pb) du Paléozoïque des Pyrénées centrales. *Mineral Deposita*, vol. 13, p. 411-421.
- POUIT G. (1980) — Les minéralisations hydrothermales sédimentaires volcanogènes. Abstract, 26^e C.G.I., Paris, vol. 3, p. 991.
- POUIT G. (1984) — Les gisements à sulfures massifs exhalatifs sédimentaires : une mise au point sur leur classification et la méthodologie de leur recherche. *Chron. rech. min.*, n° 476, p. 31-34.
- POUIT G. (1985) — Les amas sulfurés à métaux de base et soufre : typologie et objectifs de recherches au Maroc. Journées nationales du soufre, Ministère de l'Industrie et des Mines, Rabat, p. 57-65.
- POUIT G., ALSAC C. (1978) — Les faciès noirs tuffacés du Dévonien et de l'Ordovicien des Pyrénées centrales et leurs minéralisations Zn-(Pb). *C.R. Acad. Sci.*, Paris, t. 287, sér. D, p. 415-418.
- POUIT G., BOUQUET C., BOIS J.-P. (1979) — Les principaux niveaux minéralisés (Zn, Pb, Cu, Ba) du Paléozoïque des Pyrénées centrales : éléments de synthèse. *Bull. BRGM*, (2), sect. II, n° 1, p. 23-33.
- POUIT G., BOIS J.-P. (1986) — Arrens Zn-(Pb)-Ba Devonian deposit, Pyrénées, France : an exhalative-sedimentary type deposit similar to Meggen. *Mineral. Deposita*, vol. 21, n° 3, p. 181-189.
- RAGUIN E. (1946) — Découverte de roches éruptives ordoviciennes dans les Pyrénées centrales. *C.R. Acad. Sci.*, Paris, t. 223, p. 816-817.
- VÉGAS G. (1982) — Les minéralisations plombo-zincifères de la concession de Baren : leurs contextes lithologiques et géochimiques. Thèse 3^e cycle, Univ. Paul-Sabatier, Toulouse, 148 p.
- VERNHET Y. (1981) — Les minéralisations zincifères de l'Ordovicien et du Dévonien du Val d'Orlé (district de Sentein, Ariège) et de la région de Fourcay (Val d'Aran, Espagne). Thèse 3^e cycle, Univ. P.-et-M.-Curie, Paris VI, 225 p.
- VISVANATH S.N. (1957) — Étude géologique de la région minière de Sentein (Pyrénées ariégeoises). Thèse Université Nancy, 1955 ; *Sciences de la Terre*, Nancy, t. V. n° 2-3, p. 137-244.
- SITTER L.U. de, ZWART H.J. (1962) — Geological map of the Palaeozoic of the Central Pyrénées. Sheets 1 (Garonne) and 2 (Salat). *Leidse Geol. Meded.*, Deel 27, p. 191-236.