



HAL
open science

Etude métallogénique du val d'Aoste (Italie) : essai de valorisation des ressources minières par les méthodes de prospection géophysique, géochimique ou alluvionnaire

Pierre Edouard Dousset, Jean Yves Tollardo

► To cite this version:

Pierre Edouard Dousset, Jean Yves Tollardo. Etude métallogénique du val d'Aoste (Italie) : essai de valorisation des ressources minières par les méthodes de prospection géophysique, géochimique ou alluvionnaire. Minéralogie. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1981. Français. NNT : . tel-00749389

HAL Id: tel-00749389

<https://theses.hal.science/tel-00749389>

Submitted on 7 Nov 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

205.142
1981
205



Double

888
205142
1981
205

UNIVERSITE SCIENTIFIQUE
ET MEDICALE DE GRENOBLE

THESE DE DOCTORAT DE SPECIALITE
GEOLOGIE APPLIQUEE
OPTION PETROLOGIE METALLOGENIE

ETUDE METALLOGENIQUE DU VAL D'AOSTE (ITALIE)
ESSAI DE VALORISATION DES RESSOURCES MINIERES
PAR LES METHODES DE PROSPECTION GEOPHYSIQUE,
GEOCHIMIQUE ET ALLUVIONNAIRE



par Pierre-Edouard DOUSSET
et Jean-Yves TOLLARDO

soutenu le 25 Septembre 1981 devant la commission d'examen

Président:	R. MICHEL	Professeur	U. S. M. Grenoble
Rapporteur:	H. DABROWSKI	Chargé de cours	U. S. M. Grenoble
Examineurs:	R. BARBIER	Professeur	U. S. M. Grenoble
	G. ELTER	Directeur de recherche	C. N. R. I. Turin
	C. E. EHRSTRÖM	Directeur adjoint	I. R. I. G. M. Grenoble
	J. POCACHARD	Ingénieur	C. E. N. Grenoble
	P. GEX	Ingénieur	Lausanne

502142

205142
1981
205

UNIVERSITE SCIENTIFIQUE
ET MEDICALE DE GRENOBLE

THESE DE DOCTORAT DE SPECIALITE
GEOLOGIE APPLIQUEE
OPTION PETROLOGIE METALLOGENIE

ETUDE METALLOGENIQUE DU VAL D'AOSTE (ITALIE)

ESSAI DE VALORISATION DES RESSOURCES MINIERES
PAR LES METHODES DE PROSPECTION GEOPHYSIQUE,
GEOCHIMIQUE ET ALLUVIONNAIRE



par **Pierre-Edouard DOUSSET**
et **Jean-Yves TOLLARDO**

T. 81/421

soutenu le 25 Septembre 1981 devant la commission d'examen

Président:	R. MICHEL	Professeur	U.S.M. Grenoble
Rapporteur:	H. DABROWSKI	Chargé de cours	U.S.M. Grenoble
Examineurs:	R. BARBIER	Professeur	U.S.M. Grenoble
	G. ELTER	Directeur de recherche	C.N.R.I. Turin
	C.E. EHRSTRÖM	Directeur adjoint	I.R.I.G.M. Grenoble
	J. POCACHARD	Ingénieur	C.E.N. Grenoble
	P. GEX	Ingénieur	Lausanne

1801
202

UNIVERSITE MONT PIERRE
ET MEDICAL

THESE DE DOCTORAT DE SPECIALITE
MÉTALLOGÉNÉTIQUE

ETUDE METALLOGENIQUE DU VAL D'AOSTE (ITALIE)

ESSAI DE VALORISATION DES RESSOURCES MINIERES
PAR LES METHODES DE PROSPECTION GEOPHYSIQUE
GEOCHIMIQUE ET ALLUVIONNAIRE

par Pierre-Edouard DOUSSET
et Jean-Yves TOLLARD

Président : R. MICHEL
Rapporteur : H. DABROWSKI
Examinateurs : R. BARBIER, B. FITZ, C. EHRSTRÖM, J. POCACHARD, P. GEX

AVANT - PROPOS

Nous exprimons nos remerciements à Monsieur le Gouverneur et au Gouvernement du Val d'Aoste d'avoir permis la réalisation de ces recherches. Notre voeu sera que la Région puisse être satisfaite de ce mémoire.

Nous remercions Messieurs R. MICHEL, R. BARBIER, G. ELTER, H. DABROWSKI, C.E. EHRSTRÖM, J. POCACHARD et P. GEX d'avoir bien voulu critiquer ce travail et guider nos recherches. Seules la discussion et la réflexion sont profitables.

Nous n'oublierons pas l'aide apportée par :

- Monsieur et Madame P. et D. LEMERCIER, Messieurs H. LIGOZAT, F. ROBACH et M. BOF du Groupe GAMCIS CEN Grenoble; Messieurs J. LAVERLOCHERE, J. FLORESTAN, G. JOURNET, J. DIEBOLT ainsi que toute l'Equipe du Laboratoire Central d'Analyse et de Contrôle CEN Grenoble;
- Monsieur J.R. REGNARD du Laboratoire des Intéractions Hyperfines DRF CEN Grenoble;
- Monsieur P. MOLLARD du CNRS de Grenoble;
- Messieurs J.L. TANE et J. AMOSSE de l'institut de Géologie de Grenoble;
- Monsieur J. TRINQUART du Centre Interuniversitaire de Calcul de Grenoble;
- Monsieur P. PICOT du BRGM d'Orléans;
- Monsieur JAFFE de l'université de Genève.

La prospection sur le terrain fut efficacement assurée par :

- M. BARRET, J.L. GARCIAZ, A. RICHARD, T. DABROWSKI, B. MOLLIER, P. ROUSSET, F. et B. CHATAGNON, C. AYOUB, M.F. GUERY, M. FOURNIER, G. MOREAU, B. TOURLIERE, F. JOURNET, F. PETIT, C. BLANC, C. SILVY, L. MATHIAS, T. MONIER et B. GOURDAND.

Tout le personnel de l'institut Dolomieu a participé étroitement à cet ouvrage.

ADRESSES DES LABORATOIRES QUI ONT PARTICIPE A CE TRAVAIL DE RECHERCHE

Les activités de prospection générale sur le Val d'Aoste ont débuté en 1976 par la reconnaissance des réserves du gisement de magnétite de Cogne et de la recherche d'autres gisements du même type dans cette région (J. POCACHARD, 1978 et J.L. GARCIAZ, 1979).

Les recherches s'étendirent ensuite afin d'entreprendre un inventaire des ressources minérales de la Région pour les mettre en valeur.

J.Y. TOLLARDO aborde l'étude des minéralisations de magnétite et de pyrite cuivreuse à l'Est du Val d'Aoste tandis que P.E. DOUSSET, l'étude des minéralisations plombo-zincifère et fluoro-barytique à l'Ouest. Ensemble, ils ont reconnu la géologie générale et les différents gisements. Ils ont recherché les méthodes de prospections et les ont adaptées sur leur terrain.

En fonction de leurs affinités personnelles, J.Y. TOLLARDO s'intéresse à l'analyse géochimique et P.E. DOUSSET à l'analyse géophysique, l'un collaborant au travail de l'autre (méthodologie et interprétation).

Pour ce qui est du manuscrit, le travail a été réparti comme suit :

- rédaction commune :

- . Introduction
- . Méthodes de prospection
- . Inventaire des gisements et indices reconnus
- . Prospection géochimique par stream sediments
- . Prospection régionale par batées
- . Conclusions générales

- P.E. DOUSSET :

. Etude métallogénique de l'Ouest du Val d'Aoste - Gisement de Promise (Val Ruitor).

- J.Y. TOLLARDO :

. Etudes métallogéniques et prospections des gisements de Cogne et Hérin, dans les schistes lustrés de la région sud d'Aoste.

. Prospection géochimique par prélèvements de roches.

Analyse magnétique

- Groupe GAMCIS CEN GRENOBLE

Analyse des roches

- Laboratoire Central d'Analyse et de Contrôle CEN Grenoble
- Laboratoire des Interactions Hyperfines, DRF CEN Grenoble
CEN Grenoble - BP 85 X - 38041 - GRENOBLE Cedex
- CNRS Grenoble
BP 166 X - 38042 - GRENOBLE Cedex

Analyse des stream sediments

- BARRINGER MAGENTA
304 Carlingview Drive - Metropolitan Toronto - Rexdale Ontario
M9W 5G2 - CANADA

Analyse des sols

- LEA CROSS GEOPHYSICAL Co LTD
HANDWOOD - SHREWSBURY, SY5 8JT - ENGLAND

Analyse des batées

- BRGM Nantes
Division Vendée Bretagne - Rue Henri Picherit - 44300 - NANTES

Analyse statistique

- Centre Interuniversitaire de Calcul de Grenoble
BP 53X - 38041 - GRENOBLE Cedex

RIASSUNTO

Dal 1946 non è stato intrappreso, nel Val d'Aoste, nessun lavoro di geologia mineraria, salvo i giacimenti di ferro di Cogne (Val Grand Eyvia) e d'antracite di La Thuile (Val Ruitor). La nostra ricerca nella sua specificità, intende fornire alla Regione nuovi ed interessanti risultati sulle sue risorse minerarie.

I mezzi tecnici attualmente a nostra disposizione permettano di approfondire le ricerche più di quanto fosse possibile fino a qualche anno fa.

Il nostro ruolo consiste nell'adattare tali mezzi alle condizioni alpine. L'uso di metodi geofisici leggeri (polarizzazione spontanea e magnetometria) permette di localizzare i prolungamenti possibili del vecchio giacimento stratiforme di piombo-zinco di Promise (Val Ruitor).

La geochemica inserita in diverse orientazioni permette :

- di evidenziare le differenze metallogeniche tra i giacimenti di ferro della zona del Combin (Cogne) e della zona Zermatt-Saas-Fee;
- di ricercare i metalli rari (oro, platinoidi, ...) nelle "rocce verdi", e i suoi giacimenti associati (Petit-Monde);
- di seoprire dei depositi mineralizzati nascosti, attraverso lo studio dei suoli (Promise);
- di costituire un inventario mineralogico per lo studio degli alluvionni.

Tale inventario minerario sostenuto da una verifica dei vecchi giacimenti, procede di pari passo con lo studio delle condizioni che ne hanno provocato la nascita. Quest'ultimo dovrebbe servire alla valorizzazione degli indici conosciuti e alla scoperta di altri giacimenti.

ABSTRACT

Since 1946 no geological mining projects have been undertaken in the Val d'Aoste region outside of the iron deposits at Cogne (Val Grand Eyvia) and the anthracite deposits at La Thuile (Val Ruitor). Thus, we hope that our study of the area will contribute some new information of interest to the Region concerning its mining resources.

The technical means currently at our disposal allowed a more thorough investigation than would have been possible a few years ago.

We have attempted to adapt these means to alpine conditions. The use of light geophysical methods (self-potential and magnetometry) were used to locate possible extensions of the old stratiform lead-zinc lode at Promise (Val Ruitor).

The use of geochemistry has made it possible :

- to show the metallogenic differences between the iron deposits at Combin (Cogne) and those at Zermatt-Saas-Fee;
- to look for rare metals (gold, platinoids, ...) in the "green rocks" and related deposits (Petit-Monde);
- to detect hidden mineral deposits by studying soil samples;
- to establish a mineralogical inventory by the study of stream sediments and wash-trough studies.

This inventory, supported by the proving of old deposits, is accompanied by a study of the conditions which gave rise to the minerals. The study should enhance the value of known mineral shows and lead to the discovery of other deposits.

RESUME

Depuis 1946 aucun travaux de géologie minière ne furent entrepris dans le Val d'Aoste en dehors des gisements de fer de Cogne (Val Grand Eyvia) et d'antracite de La Thuile (Val Ruitor). Aussi nous pouvons espérer apporter dans notre étude régionale des résultats nouveaux susceptibles d'intéresser la Région sur ses ressources minières.

Les moyens techniques dont nous disposons actuellement permettent de pousser les investigations plus loin que cela n'était possible jusqu'à ces dernières années. Notre rôle est d'adapter ces moyens aux conditions alpines.

L'emploi des méthodes géophysiques légères (polarisation spontanée et magnétométrie) permet de localiser les prolongements possibles de l'ancien gisement stratiforme de plomb-zinc de Promise (Val Ruitor)

La géochimie intégrée dans plusieurs orientations permet :

- de mettre en évidence les différences métallogéniques entre les gisements de fer de la zone du Combin (Cogne) et de la zone Zermatt-Saas-Fee ;
- de rechercher les métaux rares (or, platinoïdes ...) dans les roches vertes et ses gisements associés (Petit-Monde, ...) ;
- de déceler des amas minéralisés cachés par l'étude des sols (Promise) ;
- d'établir un inventaire minéralogique par l'étude des stream sediments accompagnée de l'étude des batées.

Cet inventaire minier appuyé par une reconnaissance des anciens gisements, s'accompagne de l'étude des conditions qui leur ont donné naissance. Elle devrait servir à la valorisation des indices connus et à la découverte d'autres gisements.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION

1ère partie : METHODES DE PROSPECTION

Chapitre I : PROSPECTIONS GEOPHYSIQUES ... 5

1.1. LA POLARISATION SPONTANEE ... 5

1.1.1. Introduction

1.1.2. Principes

1.1.2.1. Les courants telluriques

1.1.2.2. Les potentiels électrochimiques

1.1.2.3. L'électrofiltration

1.1.2.4. Les courants d'origine météorologique

1.1.2.5. Les courants industriels

1.1.2.6. Les anomalies de polarisation spontanée aux gisements métalliques

1.1.3. Matériel

1.1.3.1. Electrodes impolarisables

1.1.3.2. Canette de fil électrique

1.1.3.3. Appareil de mesure

1.1.3.4. Boîte de compensation

1.1.3.5. Compteur de distance

1.1.4. Principe de prise de mesure

1.1.5. Mode opératoire

1.1.6. Traitements des mesures

1.1.6.1. Terrain

1.1.6.2. Laboratoire

1.1.7. Principe d'interprétation

1.2. PROSPECTION MAGNETOMETRIQUE ... 20

1.2.1. Principes fondamentaux

1.2.2. La magnétomètre à précision nucléaire

1.2.3. Matériel : le magnétomètre à protons

1.2.4. Principe de prise de mesure

1.2.5. Mode opératoire

1.2.6. Intepretation

1.3. TRAITEMENT DES DONNEES ... 26

Chapitre II : PROSPECTION GEOCHIMIQUE ... 33

2.1. DEFINITION PRINCIPE ... 33

2.2. LES DISPERSIONS GEOCHIMIQUES ... 33

2.2.1. La dispersion primaire

2.2.2. La dispersion secondaire

2.2.2.1. Processus chimiques

2.2.2.2. Processus mécaniques

2.2.2.3. Processus biogéniques

2.3. PROSPECTION GEOCHIMIQUE PAR PRELEVEMENTS DE ROCHES ... 35

2.3.1. Echantillonnage

2.3.2. Méthodes d'analyse chimique

2.3.2.1. La fluorescence X	
2.3.2.1.1. Principe	
2.3.2.1.2. Appareillage	
2.3.2.1.3. Préparation des échantillons	
2.3.2.1.4. Eléments analysés	
2.3.2.1.5. Etalons utilisés	
2.3.2.1.6. Dépouillement des résultats	
2.3.2.2. La spectrométrie d'émission	
2.3.2.3. Activation neutronique	
2.3.2.3.1. Principes théoriques	
2.3.2.3.2. Eléments analysés	
2.3.3. Méthodes d'interprétation	
2.4. LA PROSPECTION GEOCHIMIQUE PAR PRELEVEMENTS DE SOLS	... 39
2.4.1. Comportement des métaux dans la zone d'oxydation supergène des minéralisations sulfurées	
2.4.2. Dispersion des éléments autour des gisements sulfurés	
2.4.3. Echantillonnage	
2.4.4. Analyse	
2.5. PROSPECTION GEOCHIMIQUE PAR PRELEVEMENTS D'ALLUVIONS	... 41
2.5.1. Stream sediments	
2.5.1.1. Echantillonnage	
2.5.1.2. Analyse	
2.5.1.3. Méthode d'interprétation-Traitement des données	
2.5.1.3.1. Traitement statistique simplifié des données géochimiques.	
2.5.1.3.1.1. Distribution des éléments	
2.5.1.3.1.2. Construction de la courbe des fréquences cumulatives	
2.5.1.3.2. Tracé des cartes	
2.5.2. Prospection alluvionnaire par batée.	
2ème Partie : <u>ETUDE GITOLOGIQUE DU VAL D'AOSTE</u>	49
<u>Chapitre I</u> : INVENTAIRE DES GISEMENTS ET INDICES RECONNUS	... 51
1.1. LES GISEMENTS DE MAGNETITE ASSOCIES AUX SERPENTINITES ; INVENTAIRE, DESCRIPTION ET SITUATION GEOLOGIQUE SOMMAIRE	... 51
1.1.1. Les gisements de la zone du Combin	
1.1.1.1. Cogne	
1.1.1.2. Larsinaz	
1.1.1.3. Plan François	
1.1.1.4. Carlo Muta	
1.1.1.5. Montzocco	
1.1.2. Les gisements de magnétite de la zone Zermatt-Saas-Fee	
1.1.2.1. Val Ponton	
1.1.2.2. Lac gelé	
1.1.2.3. Ussef	
1.1.2.4. Raye Chevrère	
1.1.2.5. Valmériana	
1.2. INDICES CUPRIFERES	... 56
1.2.1. Gisement de Chuc-Servette	
1.2.2. Gisements de Lovignana et Tramail de la Rouse	
1.2.3. Mine d'Hérin	
1.2.4. Mine d'Ollomont	
1.2.5. Mine de Bionaz	
1.2.6. Mine de Vorpilles	

1.2.7. Mine de Petit-Monde	
1.2.8. Mine d'Ayas	
1.2.9. Mine d'Effraz	
1.2.10 Mine de Salsa Schelbete	
1.3. GISEMENTS DE MANGANESE	... 67
1.3.1. Mine de Prabornaz	
1.3.2. Mine d'Issologne	
1.3.3. Indice de Robbio	
1.3.4. Indice du Val Grauson	
1.4. GISEMENTS DE PLOMB, ZINC ET CUIVRE	... 71
1.4.1. Indice de Valeille	
1.4.2. Mine de Promise	
1.5. GISEMENT FLUORO-BARYTIQUE : TROU DES ROMAINS	... 72
Introduction	
Cadre géologique	
Géométrie du gisement	
Aspect structural	
Minéralogie	
Sections polies	
Géophysique	
Conclusions	
1.6. GISEMENTS AURIFERES	... 76
1.6.1. Indice de Pisse	
1.6.2. District de Challant (Brusson)	
Chapitre II : ETUDES METALLOGENIQUES ET PROSPECTIONS DES GISEMENTS DE COGNE ET HERIN, DANS LES SCHISTES LUSTRES DE LA REGION SUD D'AOSTE	... 77
2.1. PRESENTATION DES ENSEMBLES GEOLOGIQUES	... 77
2.1.1. Le domaine austro-alpin	
2.1.2. Le domaine pennique ; les schistes lustrés au sens large.	
2.1.2.1. La zone du Combin	
2.1.2.2. La zone de Zermatt-Saas-Fee	
2.1.2.3. Style tectonique	
2.2. METALLOGENIE REGIONALE	... 80
2.3. LES GISEMENTS DE MAGNETITE	... 80
2.3.1. Le gisement de Cogne	... 82
2.3.1.1. Contexte pétrographique	
2.3.1.2. Géométrie du gisement	
2.3.1.3. Etude géochimique	
2.3.1.3.1. Nomenclature utilisée	
2.3.1.3.2. Analyse Cs	
2.3.1.3.2.1. Etude statistique monovariante	
2.3.1.3.2.2. Etude statistique multivariante	
2.3.1.3.2.3. Bilan de l'analyse Cs	
2.3.1.3.3. Analyse Cm	
2.3.1.3.3.1. Etude statistique monovariante	
2.3.1.3.3.2. Etude statistique multivariante	

2.3.1.3.3. Bilan de l'analyse Cm		
2.3.1.3.4. Conclusions	...	96
2.3.2. Les gisements de la zone Zermatt-Saas-Fee		
2.3.2.1. Caractères généraux		
2.3.2.2. Etude géochimique		
2.3.2.2.1. Nomenclature utilisée		
2.3.2.2.2. Analyse Em+Es		
2.3.2.2.2.1. Etude statistique monovariante		
2.3.2.2.2.2. Etude statistique multivariante		
2.3.2.2.2.3. Bilan de l'analyse Em+Es		
2.3.2.2.3. Analyse Es		
2.3.2.2.3.1. Etude statistique monovariante		
2.3.2.2.3.2. Etude statistique multivariante		
2.3.2.2.3.3. Bilan de l'analyse Es		
2.3.2.2.4. Analyse Em		
2.3.2.2.4.1. Etude statistique monovariante		
2.3.2.2.4.2. Etude statistique multivariante		
2.3.2.2.4.3. Bilan de l'analyse Em		
2.3.2.2.5. Conclusions		
2.3.3. Comparaison entre les gisements de la zone de Zermatt-Saas-Fee et de la zone du Combin	...	110
2.3.3.1. Données pétrographiques		
2.3.3.1.1. Caractères communs		
2.3.3.1.2. Différences		
2.3.3.2. Données magnétiques		
2.3.3.3. Aimantations spécifiques à saturation		
2.3.3.4. Spectroscopie Mössbauer		
2.3.3.5. Les sections polies		
2.3.3.6. Diagramme MgO/Fe ₂ O ₃ - Ni/Cr		
2.3.3.7. Analyses en composantes principales		
2.3.3.8. Caractères géochimiques des serpentinites et des magnétites dans les deux zones	...	115
2.3.4. Conclusions	...	115
2.4. ETUDES GEOLOGIQUES, GEOPHYSIQUES ET GEOCHIMIQUES SUR LE GISEMENT D'HERIN-CHAMPDEPRAZ (Fe-Cu)	...	119
2.4.1. Situation géographique		
2.4.2. Historique de la mine -Travaux miniers		
2.4.3. Contexte géologique		
2.4.4. Géométrie du gisement		
2.4.5. Caractères pétrographiques		
2.4.5.1. Les métasédiments		
2.4.5.2. Les faciès basiques		
2.4.5.2.1. Les glaucophanites		
2.4.5.2.2. Les chloritoschistes		
2.4.6. Minéralisation		
2.4.7. Caractères géochimiques du gisement		
2.4.7.1. Les éléments majeurs et mineurs		
2.4.7.2. Les éléments en traces		
2.4.8. Prospections effectuées		
2.4.8.1. Prospections géophysiques		
2.4.8.1.1. Prospections magnétiques		
2.4.8.1.1.1. Profils de référence		
2.4.8.1.1.2. Profils effectués à l'aplomb de la minéralisation		

2.4.8.1.2. Prospection par polarisation spontanée		
2.4.8.2. Prospection géochimique par stream sediments		
2.4.8.2.1. Variabilités géologiques classées par ordre croissant		
2.4.8.2.2. Analyse en composantes principales normées		
2.4.8.2.2.1. Dendrogramme de corrélations positives		
2.4.8.2.2.2. Description des facteurs		
2.4.8.2.2.3. Projection sur les plans des facteurs		
2.4.9. Bilan des prospections effectuées sur le site d'Hérin ...		134
Chapitre III : ETUDE METALLOGENIQUE DE L'OUEST DU VAL D'AOSTE-GISEMENT DE PROMISE (VAL RUITOR)	...	135
3.1. INTRODUCTION	...	135
3.2. GEOLOGIE GENERALE	...	136
3.2.1. Les grandes unités structurales		
3.2.2. Evolution orogénique		
3.2.2.1. Orogenèse anté hercynienne		
3.2.2.2. Orogenèse hercynienne		
3.2.2.3. Orogenèse alpine		
3.2.3. Géologie du NW du Val d'Aoste		
3.2.3.1. Le socle cristallin		
3.2.3.2. Les zones helvétique et ultrahelvétique		
3.2.3.3. La zone des brèches de Tarentaise		
3.2.3.4. La zone briançonnaise		
3.2.3.5. La zone piémontaise ou zone des schistes lustrés		
3.3. ETUDE DETAILLEE DE LA ZONE BRIANCONNAISE EXTERNE, AU SW DE LA DOIRE BALTEE	...	139
3.3.1. Caractères lithologiques		
3.3.2. L'anthracite de La Thuile		
3.3.3. Aperçu structural de la zone briançonnaise externe		
3.3.3.1. Cadre structural		
3.3.3.2. Interprétation photogéologique		
3.3.3.3. Résumé		
3.3.4. Etude pétrographique ; le métamorphisme		
3.3.4.1. Quartz		
3.3.4.2. Phyllites		
3.3.4.3. Calcite		
3.3.4.4. Plagioclase		
3.3.4.5. Minéraux opaques		
3.4. ETUDE METALLOGENIQUE DU GISEMENT DE PROMISE	...	146
3.4.1. Introduction		
3.4.2. Historique		
3.4.3. Cadre régional		
3.4.4. Contexte géologique du gisement de Promise		
3.4.5. Géométrie du gisement		
3.4.6. Sections polies		
3.4.7. Etude géochimique sur le site minier Promise		
3.4.7.1. Géochimie régionale des roches		
3.4.7.2. Géochimie des haldes de la mine de Promise		
3.4.7.3. Géochimie du minerai de la mine de Promise		
3.4.7.4. Relations entre minerai et encaissant		
3.4.8. Conclusions	...	153

3.5. INTERPRETATION DES RESULTATS GEOPHYSIQUES ET GEOCHIMIQUES ...	154
SUR LE SITE DE PROMISE	
3.5.1. Introduction	
3.5.2. Développement	
3.5.3. Prospection géophysique à caractère régional ...	155
3.5.3.1. Introduction	
3.5.3.2. Prospection par polarisation spontanée	
3.5.3.2.1. Profils de reconnaissance	
3.5.3.2.1.1. Profils de reconnaissance dans la mine de Promise	
3.5.3.2.1.2. Profils de reconnaissance à l'aplomb de la mine	
3.5.3.2.2. Mesures de polarisation spontanée	
3.5.3.2.2.1. Les cartes de polarisation spontanée	
3.5.3.2.2.2. Analyse des profils de polarisation spontanée les plus caractéristiques	
3.5.3.2.3. Conclusions	
3.5.3.3. Prospection magnétique	
3.5.3.3.1. Profils de reconnaissance	
3.5.3.3.2. Mesures magnétiques	
3.5.3.3.3. Conclusions	
3.5.4. Prospection géophysique à caractère tactique ...	166
3.5.4.1. Introduction	
3.5.4.2. Zone I	
3.5.4.2.1. Données géologiques	
3.5.4.2.2. Données géophysiques	
3.5.4.2.2.1. Carte magnétique	
3.5.4.2.2.1.1. Observation de la carte	
3.5.4.2.2.1.2. Conclusions	
3.5.4.2.2.2. Carte de polarisation spontanée	
3.5.4.2.2.2.1. Observation de la carte simplifiée	
3.5.4.2.2.2.2. Conclusions	
3.5.4.2.2.3. Etude comparative	
3.5.4.3. Zone II	
3.5.4.3.1. Données géologiques	
3.5.4.3.2. Carte magnétique	
3.5.5. Susceptibilité magnétique des roches ...	171
3.5.6. Prospection géochimique ...	172
3.5.6.1. Géochimie des stream sediments sur le plateau Chaz-Duraz	
3.5.6.1.1. Carte des anomalies	
3.5.6.1.2. Dendrogramme des corrélations positives	
3.5.6.1.3. Conclusions	
3.5.6.2. Géochimie des sols	
3.5.6.2.1. Chaz-Duraz	
3.5.6.2.2. Val Ruitor	
3.5.6.2.3. Conclusions	
3.5.7. Critique des méthodes ...	175
3.5.7.1. Polarisation spontanée	
3.5.7.2. Magnétométrie	
3.5.7.3. Stream sediments et sols	
3.5.8. Conclusions ...	176
3.5.9. Programme de recherche	

3ème partie : RESULTATS

<u>Chapitre_I</u> : PROSPECTION GEOCHIMIQUE PAR PRELEVEMENTS DE ROCHES ...	179
1.1. LES AMPHIBOLES ... 179	
1.1.1. Caractères minéralogiques	
1.1.2. Origine des amphiboles	
1.1.3. Caractères géochimiques	
1.1.3.1. Analyse statistique monovariante	
1.1.3.2. Analyse statistique multivariante	
1.1.3.2.1. Etude des corrélations. Dendrogramme des corrélations positives.	
1.1.3.2.2. Etude des facteurs	
1.1.3.2.3. Projection des variables sur le plan des facteurs	
1.1.3.3. Anomalies géochimiques	
1.2. LES SERPENTINITES ... 188	
1.2.1. Les platinoïdes	
1.2.2. Les terres rares	
1.2.3. L'or, le tungstène, l'arsenic	
1.3. LES AUTRES ROCHES ... 191	
1.3.1. Les micaschistes	
1.3.2. Mine de Petit-Monde	
1.4. CONCLUSIONS ... 192	
<u>Chapitre_II</u> : PROSPECTION GEOCHIMIQUE PAR STREAM SEDIMENTS ...	193
2.1. TRAITEMENT DES DONNEES - PRESENTATION DES RESULTATS ... 194	
2.2. TRAITEMENT STATISTIQUE MULTIVARIABLE (ANALYSE DES COMPOSANTES PRINCIPALES NORMEES ... 195	
2.2.1. Statistiques monovariantes	
2.2.2. Interprétation de la matrice de corrélation. Etude du dendrogramme des corrélations positives	
2.2.3. Description des facteurs	
2.2.4. Projection sur les plans des facteurs	
2.3. INTERPRETATION DES CARTES DE REPARTITION DES ELEMENTS ... 198	
2.3.1. Vallées de Saint-Marcel, Grauson et Grand Eyvia	
2.3.1.1. Vallon Saint Marcel	
2.3.1.2. Haut Vallon du Grand Eyvia	
2.3.1.3. Val Grauson	
2.3.2. Vallon de Valeille	
2.3.3. Vallées de Gressoney et Ayas	
2.3.3.1. Vallée de Gressoney	
2.3.3.2. Val d'Ayas	
2.3.4. Val Vény - Val Ferret	
2.3.4.1. Val Vény	
2.3.4.2. Val Ferret	
2.3.5. Val Ruitor	
2.4. BILAN DE LA PROSPECTION PAR STREAM SEDIMENTS ... 210	

<u>Chapitre III</u> - PROSPECTION REGIONALE PAR BATEES	...	211
3.1. CONDITIONS DE PRELEVEMENT	...	212
3.2. OBSERVATIONS SUR LA CARTE DES CONCENTRES DE L'OUEST DU VAL D'AOSTE.	...	212
3.3. OBSERVATION SUR LA CARTE DES CONCENTRES DU VAL D'AYAS	...	213
3.4. CONCLUSIONS	...	214
RECAPITULATIF DES RESULTATS	...	215
PROGRAMME	...	219
CONCLUSIONS GENERALES	...	223

INTRODUCTION

Les prospections entreprises dans le Val d'Aoste ont trois objectifs :

- entreprendre un inventaire des ressources minérales de la Région ;
- adapter les méthodes de prospection géophysique et géochimique aux problèmes métallogéniques, destinées à mettre en valeur les ressources minérales, à les localiser et à comprendre leur origine et leur mise en place dans le contexte alpin ;
- orienter les prospections futures pour découvrir de nouveaux gisements.

Pour répondre à ces objectifs, nous avons réalisé :

- une étude bibliographique à partir des documents appartenant à l'Office Minier italien, à l'Institut de Géologie de Turin, à la mine de Cogne et à l'Institut de Géologie Dolomieu de Grenoble ;
- une étude géologique sommaire sur les gîtes choisis en fonction de leur importance. La reconnaissance des anciens gisements, leur géométrie, leur extension et leur paragenèse nous ont amené à nous poser le problème de leur origine et de leur mise en place ;
- une étude géochimique du gisement de Cogne (Val Grand Eyvia) complétant les études géologiques et géophysiques (magnétométrie) antérieures (J.L. Garciaz, 1979 et J. Pocachard, 1980) ;
- une étude géochimique (stream sediments, sols et roches) et géophysique (polarisation spontanée et magnétométrie) à caractère régional sur les sites d'Hérin (cuivre) à Champdepraz et de Promise (plomb-zinc-argent) dans le Val Rutor, contribuant à une connaissance de l'extension des gisements ;
- une étude des prélèvements alluvionnaires par stream sediments (310 échantillons représentant 7500 résultats) et par batées (80 concentrés de fond de batées) sur l'ensemble de la Région, dégagant les caractères métallogéniques régionaux.

Les méthodes que nous avons utilisées sont appliquées communément à la prospection minière. Nous les avons adaptées aux conditions géologiques et géomorphologiques (relief prononcé) du Val d'Aoste.

GEOPHYSIQUE

La prospection par polarisation spontanée, actualisée par P. Gex (1977) est une méthode simple et rapide pour la recherche de certains gisements (certains anthracites, le graphite et quelques sulfures). Le problème majeur dans la prospection du site de Promise (Val Ruitor) est de différencier ces minéralisations. Nous levons l'indétermination par l'utilisation d'autres méthodes (prospection magnétométrique ou géochimie des sols). La minéralisation d'Hérin (Champdepraz) est décelée par polarisation spontanée.

La prospection magnétométrique décèle les roches possédant un contraste d'aimantation avec leur encaissant. Cette méthode a permis de donner une estimation qualitative et quantitative de certaines anomalies (Promise).

Le dépouillement des mesures géophysiques est facilité par l'infrastructure informatique du groupe GAMCIS (CEN Grenoble).

GEOCHIMIE

L'inventaire géochimique (roches, stream sediments et sols) nécessite l'emploi de méthodes d'analyse à grand rendement :

- les roches analysées (éléments majeurs et mineurs) par fluorescence X et spectrométrie d'émission du Laboratoire Central d'Analyse et de Contrôle (CEN Grenoble) ont fourni 7000 résultats. Les éléments traces (or, terres rares et platinoïdes) ont été détectés par activation neutronique (même laboratoire);
- les prélèvements de stream sediments ont été analysés (éléments majeurs, mineurs et traces) avec une torche à plasma dans le laboratoire canadien Barringer Magenta ;
- les sols ont été analysés (Cu, Pb, Zn et Ag) par absorption atomique dans le laboratoire anglais Lea Cross Geophysical.

Notre problème est de savoir s'il existe une différence géochimique entre les gisements de fer de Cogne et de la zone Zermatt-Saas-Fee. En outre, cette étude est complétée par l'inventaire géochimique de l'ensemble des roches analysées. La synthèse est réalisée par l'étude statistique multivariante (analyse en composantes principales normées, A.C.P.N.).

La présentation des données de stream sédiments et de sols (carte des anomalies) a été faite avec l'aide de la calculatrice programmable HP 41 C.

MINERALOGIE

Les 80 concentrés de fond de batées ont été analysés au BRGM de Nantes (microscopie optique).

Les 22 sections polies de minerai, préparées par l'Institut de Géologie de Genève, ont été étudiées avec la participation de P. Picot (microscopie optique) au BRGM d'Orléans.

La synthèse de tous ces travaux, avec l'interprétation géologique, sont présentées en fin de chaque paragraphe et en fin de mémoire.

Nous terminons ce mémoire en proposant quelques conclusions sur les genèses des minéralisations métallifères du Val d'Aoste. Elles pourraient être un guide pour les prospections futures dans les Alpes.

PREMIERE PARTIE : METHODES DE PROSPECTION

CHAPITRE I

PROSPECTIONS GEOPHYSIQUES

1.1. LA POLARISATION SPONTANEE1.1.1. Introduction

"La polarisation spontanée ou P.S. (en anglais S.P. = de self-potential) est une méthode de prospection électrique fondée sur l'étude des différences de potentiels créées dans le sol par des courants continus naturels émis par certains minerais à conductibilité électronique " (P.Gex , 1977).

Nous avons utilisé la polarisation spontanée sur les sites miniers de La Thuile-Promise dans le Val Rutor (sulfures de zinc et de plomb argentifère) et Herin à Champdepraz (sulfures de cuivre et fer), afin de déterminer la prolongement des structures minéralisées dont les paragenèses semblent bien adaptées à cette méthode de prospection.

L'essentiel de ce chapitre est tiré de l'ouvrage de Pierre Gex, "La Méthode de Polarisation Spontanée" (1977) ainsi que de nombreuses discussions que nous avons eues avec son auteur.

Avis au lecteur : dans ce qui suit, il faut comprendre "niveau de potentiel" en lisant "amplitude".

1.1.2. Principes

Les courants électriques qui traversent le sous-sol, mis en évidence par les différences de potentiel qu'ils engendrent entre deux points, ont des origines diverses :

1.1.2.1. Les courants telluriques

Ils sont liés à l'activité solaire. Ils ont de faibles amplitudes (quelques mV/km) et sont donc décelables sur les très longs profils où la distance entre le point de mesure et la référence peut atteindre 500 m.

1.1.2.2. Les potentiels électrochimiques

L'eau contenue dans les roches, même immobile, constitue un électrolyte naturel qui peut varier en composition et en concentration dans l'espace. L'hétérogénéité des électrolytes engendre des potentiels de membrane et de jonction liquide dont l'amplitude est de l'ordre de quelques dizaines de mV.

1.1.2.3. L'électrofiltration

Ces potentiels sont créés par le frottement de l'eau circulant dans les roches. Ils sont fonction du gradient hydraulique et des caractéristiques physico-chimiques de l'eau (constante diélectrique, viscosité, conductibilité, nature physico-chimique des capillaires traversés).

Ils se manifestent surtout dans les terrains à fort relief en suivant les variations de la topographie. Ce phénomène étant essentiellement lié au relief, peut être facilement corrigé au moment de l'interprétation des courbes. L'amplitude des potentiels est de l'ordre de 100 à 200 mV, négatif dans le cas d'une filtration per descensum et inversement.

1.1.2.4. Les courants d'origine météorologique

Les courants sont uniquement décelables au moment des orages météorologiques et sont liés à l'ionisation de l'air.

L'amplitude peut être très forte (± 2 V) et instable dans le temps. Ils empêchent toute prospection.

1.1.2.5. Les courants industriels

Ils sont provoqués par les fuites d'installations électriques industrielles diverses (lignes de chemin de fer, lignes à haute tension). Souvent instables, ils peuvent contrarier les prises de mesure.

1.1.2.6. Les anomalies de polarisation spontanée liées aux gisements métalliques

Remarques et règles de prospection à observer dans la recherche d'un gisement sulfureux par polarisation spontanée :

- la différence de potentiel par rapport à une référence éloignée est généralement de signe négatif, mais il existe des exceptions ;
- l'amplitude est de l'ordre de plusieurs centaines de mV ;
- les minéraux qui conditionnent le phénomène P.S. sont essentiellement des sulfures (pyrite, chalcopirite, pyrrhotite, chalcosine, arsénopyrite, covelline, galène), le graphite et certains sulfates ;
- les mesures sont stables dans le temps ;
- la continuité électrique du minerai et l'existence d'un niveau hydrostatique sont nécessaires (l'aridité, le gel ou la sursaturation en eau du sol peuvent diminuer ou éliminer l'intensité des phénomènes de polarisation spontanée).

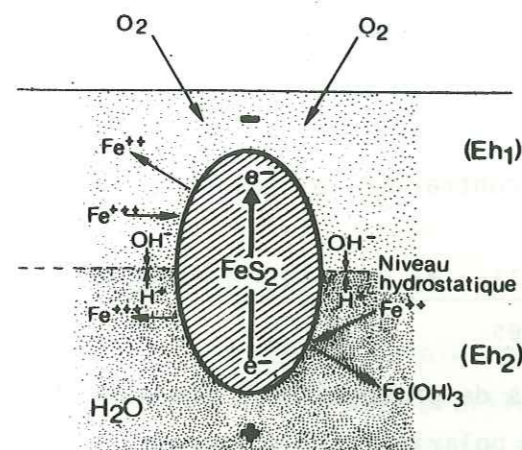
La cause des anomalies de polarisation spontanée, au-dessus d'un gisement, semble être basée sur le principe de la préservation de la neutralité électrique lors des réactions d'oxydo-réduction qui se produisent au contact gisement-encaissant.

Parmi les modèles proposés (Schlumberger (1920), Heiland (1940)), nous retenons la théorie de Sato et Mooney (1960).

Le gisement sulfureux ou graphiteux agit comme une pile électrique. Le niveau hydrostatique crée une dissymétrie chimique et électrique qui est compensée par une diffusion électronique (fig. 1).

Avant d'engager une prospection, il est souhaitable de faire une étude préliminaire avec quelques essais, afin d'être certain de l'efficacité de la méthode sur le site choisi. Ceci peut être réalisé très rapidement grâce à un matériel P.S. simple dont la description est donnée ci-dessous.

Fig.1: Sato et Mooney (1960)



1.1.3. Matériel

Le matériel que nous avons utilisé, a été conçu par P. Gex. Nous avons réalisé, nous mêmes, une grande partie de ces appareils et leur simplicité permet de les reproduire en plusieurs exemplaires.

Le matériel comprend :

- deux électrodes impolarisables ;
- une canette de fil électrique ;
- un millivoltmètre sensible ;
- une boîte de compensation ;
- un compteur kilométrique.

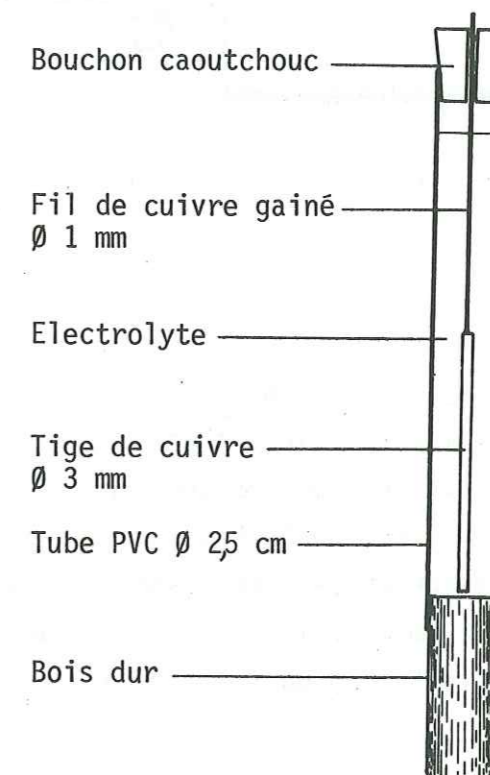
1.1.3.1. Électrodes impolarisables (Fig. 2)

Les électrodes sont constituées d'un tube de P.V.C. de 20 mm de diamètre, long de 30 cm et 1,20 m, suivant son rôle (respectivement électrode de relais ou référence et électrode de mesure). Un morceau de bois dur et légèrement poreux (nous avons utilisé du hêtre) est emboîté à une extrémité du tube. La tige de cuivre (longue de 10 à 15 cm et de 3 mm de diamètre), reliée à un fil de cuivre gainé, est posée sur l'embout de bois dur. Un bouchon de caoutchouc, transpercé par le fil de cuivre, ferme l'autre extrémité du tube. L'ensemble tige et fil de cuivre gainé baigne dans le sulfate de cuivre sursaturé. La soudure à l'étain du fil sur la tige provoque, avec le sulfate, des potentiels parasites. Il est nécessaire de recouvrir la soudure avec de la colle forte.

Il faut confectionner un nombre suffisant d'électrodes référence et relais en fonction du terrain pratiqué.

Le bois poreux s'imprègne de sulfate de cuivre. Lorsque les électrodes sont en contact avec le sol, la mesure de la différence de potentiel entre deux points se matérialise par une réaction ionique entre cuivre et sulfate de cuivre.

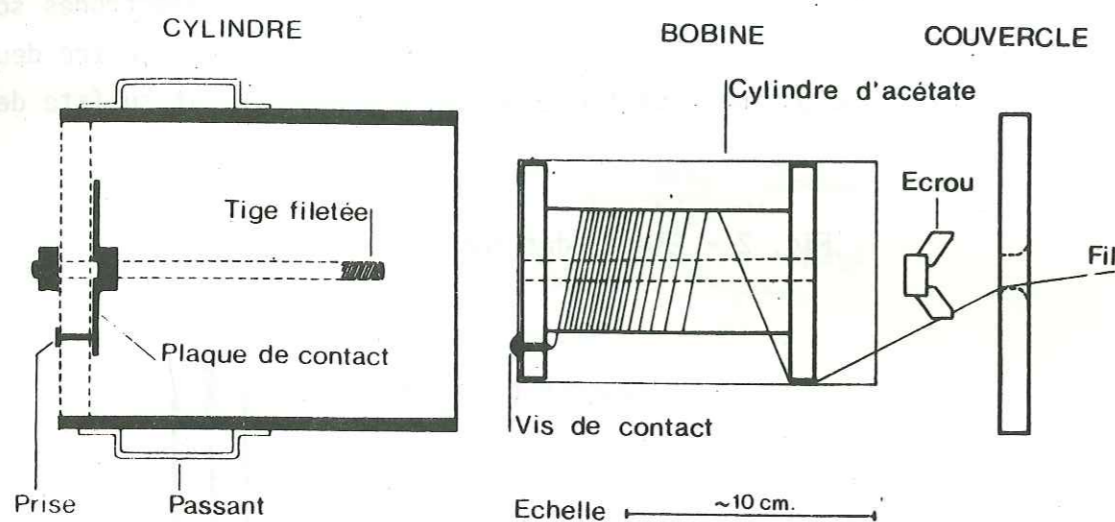
Fig. 2 - Electrodes impolarisables



1.1.3.2. Canette de fil électrique (Fig. 3)

Elle consiste en un gros tube de plastique enveloppant une bobine fixe de fil de cuivre qui se libère axialement par une légère traction du fil.

Fig. 3 - Vue explosée de la canette.



Le fil de cuivre, choisi pour la bobine, est utilisé habituellement pour le bobinage des moteurs électriques et transformateurs. C'est un fil de cuivre émaillé qui se vend par grosse bobine de 5 à 6 kg.

Le diamètre du fil est de 0,18 mm. Sa ductilité élevée lui permet de limiter les ruptures accidentelles. Avec une bobineuse industrielle il est possible d'enrouler 5 à 6 km de fil de cuivre sur une bobine (10 cm x 10 cm). La résistance électrique du fil est de 600Ω par kilomètre.

1.1.3.3. Appareil de mesure

Nous avons utilisé un contrôleur électronique numérique du commerce (affichage cristaux liquides), de marque Fluke.

Les caractéristiques de l'appareil sont les suivantes :

- gammes de mesure : 0,1 mV à 200 mV
200 mV à 2 V ;
- impédance d'entrée: $10 M\Omega$;
- autonomie : 1 000 heures ;
- poids : 350 g ;
- dimensions : 18 cm x 18 cm x 4 cm.

La sensibilité et l'impédance élevée sont suffisantes pour obtenir des mesures stables, même en terrain sec (haldes, éboulis).

1.1.3.4. Boîte de compensation (Fig. 4)

Le dispositif électronique simple est une source de tension réglable avec précision de 0 à ± 750 mV (alimentation par pile 1,5 V), par un potentiomètre multitours. L'ensemble est logé dans un boîtier aluminium et ne pèse que 200 g.

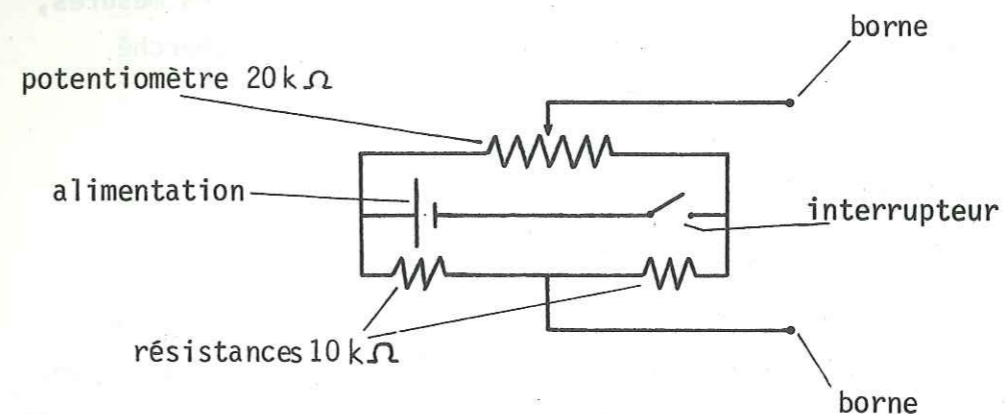


Fig. 4 : Schéma électronique de la boîte de compensation.

1.1.3.5. Compteur de distance

Le compteur de distance, fixé sur l'appareil de mesure Fluke, donne les distances entre chaque mesure et le total des distances parcourues. Il est actionné par le fil de cuivre qui se dévide de la canette, l'autre extrémité du fil étant fixée sur l'électrode de référence.

Le compteur, de fabrication Huret, est habituellement utilisé sur les bicyclettes. La résolution est le mètre avec une erreur d'environ 1 à 3 %, ce qui est très satisfaisant.

1.1.4. Principe de prise de mesure

Parmi les différents modes de prises de mesures (méthode du pas, de la bobine, de la canette, etc., P. Gex, 1977) nous avons choisi la méthode de la canette.

Notre rôle était de déterminer l'extension d'un gisement. Dans cette optique, il faut une grande liberté de mouvement dans un champ d'action important, avec une progression rapide à partir d'une référence fixe.

L'électrode de référence fixe constitue le potentiel "0" ; zéro unique pour tout l'espace de la prospection.

Le choix de l'emplacement de cette électrode est déterminé par tâtonnement, jusqu'à obtention d'un zéro sur l'appareil (± 30 mV sur 100 m de profil environ, sur une zone sans variation de relief, en dehors de toute anomalie).

La progression s'effectue selon un espacement variable entre les mesures, qui est déterminé en fonction de la géologie et de l'objet recherché (5, 10 ou 20 m entre chaque prise de mesure).

1.1.5. Mode opératoire (Fig. 5)

Pour la prise de mesure, le dispositif est le suivant :

Le fil de cuivre 0,18 mm sort de la canette et se fixe sur l'électrode de référence après être enroulé autour de l'axe du compteur kilométrique. La connection se poursuit ensuite de la canette à la boîte de compensation (interrupteur ouvert), de la boîte de compensation à l'appareil de mesure (le fil de la référence doit être placé sur la borne neutre pendant toute la prospection), de l'appareil de mesure à l'électrode de mesure.

Un seul opérateur effectue la prise de mesure et le transport des appareils. Un autre opérateur note les mesures, les distances, les reports topographiques, les annotations géologiques et indique l'orientation de la progression par visées à la boussole ou par rapport à des repères naturels cartographiés. La prospection est possible avec une seule personne.

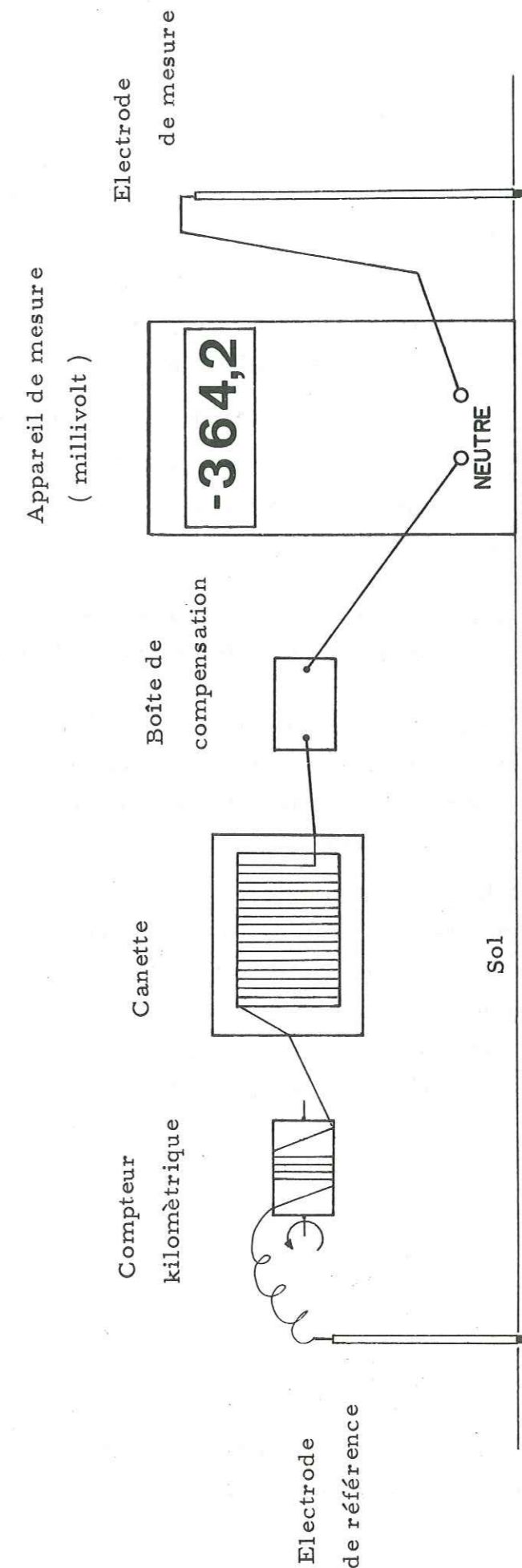
Si au cours de la prospection le fil est rompu accidentellement, une électrode de relais est plantée à l'emplacement de la dernière mesure. L'interrupteur de la boîte de compensation doit être fermé et à la dernière valeur du potentiel au point considéré est affiché sur l'appareil de mesure grâce au potentiomètre multitours de la boîte de compensation. La manipulation continue sans qu'on soit obligé de retourner à l'électrode de référence.

L'espacement entre chaque mesure est déterminé en fonction de l'objet recherché, du contexte géographique et du temps réservé à la prospection.

Exemple de La Thuile-Promise :

- superficie du terrain : 15 km^2 , dont 60 % dans des conditions difficiles (relief accentué et végétation importante) ;
- structure de la minéralisation : stratiforme, lenticulaire
 - épaisseur faible : de l'ordre du mètre ;
 - longueur en direction : plusieurs kilomètres.

Fig. 5 - MODE OPERATOIRE (branchement des appareils).



- temps réservé à la prospection : 1 mois.

La progression s'effectue perpendiculairement à la structure minéralisée, avec un espacement entre chaque mesure de potentiel de 5, 10 ou 20 m. La maille de prise de mesure est resserrée lorsque le potentiel varie trop rapidement entre deux points consécutifs.

L'écartement entre chaque ligne de polarisation spontanée varie entre 200, 100, 50 et 25 m, en fonction des résultats obtenus, en commençant par un écartement maximal que l'on réduit ensuite.

Cette première méthode est à maille irrégulière et de type stratégique.

Sur le site La Thuile-Promise nous avons parcouru 60 km de profil en 15 jours, avec deux équipes indépendantes soit environ 300 mesures par équipe et par jour.

Des émetteurs-récepteurs permettent aux équipes de rester en contact permanent et de donner des renseignements sur l'évolution de la prospection.

Un deuxième type de prospection, dit tactique, a été utilisé : prospection à maille carrée régulière de 15 m sur une superficie de 11 hectares, équivalent à 8 km de profils, en trois heures, sur une zone dégagée (250 mesures par heure et par appareil).

Avantage de la méthode de la canette.

Cette méthode permet de parcourir des distances considérables en se rapportant à une référence fixe, ce qui est très apprécié pour la réalisation d'une carte d'équipotentiels.

En terrain difficile, il est possible d'abandonner le fil de cuivre 0,18 mm (un mois après la prospection, le fil perd facilement son émail et il se désagrège rapidement) ou les électrodes de relais d'un prix de revient peu onéreux.

1.1.6. Traitement des mesures

1.1.6.1. Terrain

Sur le terrain, après chaque fin de journée, nous rapportons toutes les mesures sur papier millimétré (les distances parcourues en abscisses et les différences de potentiel en ordonnées). Ensuite nous comparons et corrélons les différents profils obtenus par chaque équipe.

Cette méthode, souvent contraignante, est fort utile. Elle permet d'orienter la prospection pour les jours suivants.

1.1.6.2. Laboratoire

Toutes les données de terrain ont été traitées par ordinateur afin de présenter différents modes de représentation (profils et cartes). Nous étudierons à la fin de ce chapitre les différentes manières de figurer les résultats ainsi que la mise en valeur des fluctuations des données sur table traçante, sous forme de cartes ou de profils aussi bien en magnétométrie qu'en polarisation spontanée.

1.1.7. Principe d'interprétation

L'interprétation des résultats se fonde sur des principes simples déjà bien établis : les anomalies de polarisation spontanée sont engendrées par concentrations de sulfures qui peuvent être assimilées à des modèles théoriques de dipôles électriques ou doubles lignes de pôles (Fig. 6).

Structures	Cartes équipotentiels
- dipôles verticaux	- anomalies négatives subcirculaires
- dipôles inclinés	- juxtaposition d'anomalies positive et négative circulaires
- double ligne de pôles verticale infinie ou finie	- anomalie négative elliptique
- double ligne de pôles inclinée	- juxtaposition d'anomalies positive et négative elliptiques.

Les structures dipolaires inclinées peuvent être interprétées par les diagrammes de De Witte (1946) (Fig. 7).

Fig. 6 : MODELES THEORIQUES

d'après P. Gex (1977).

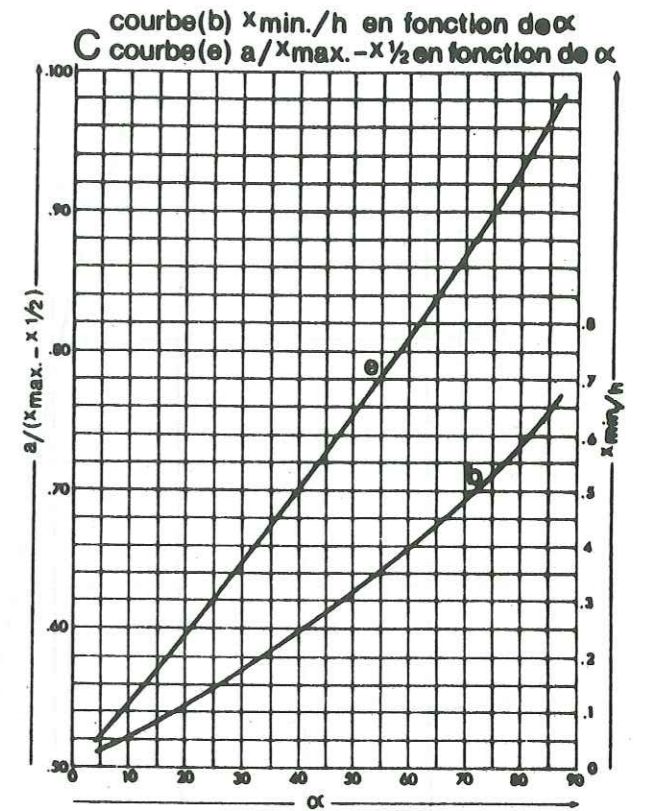
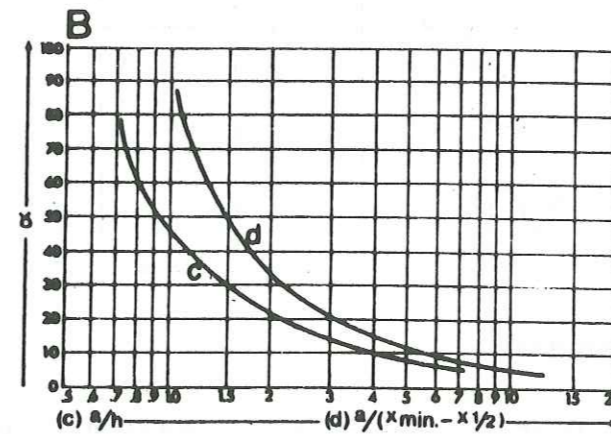
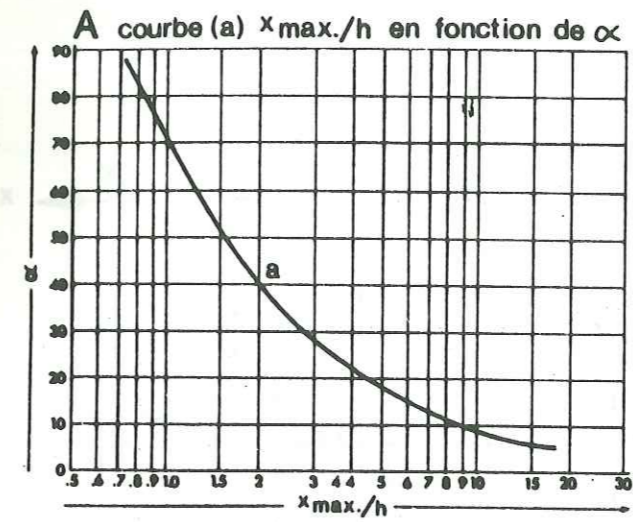
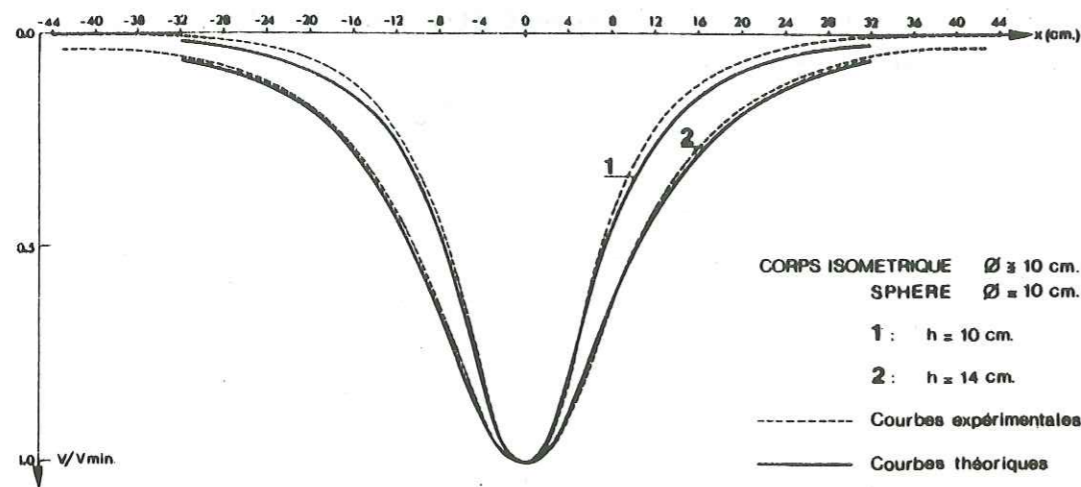
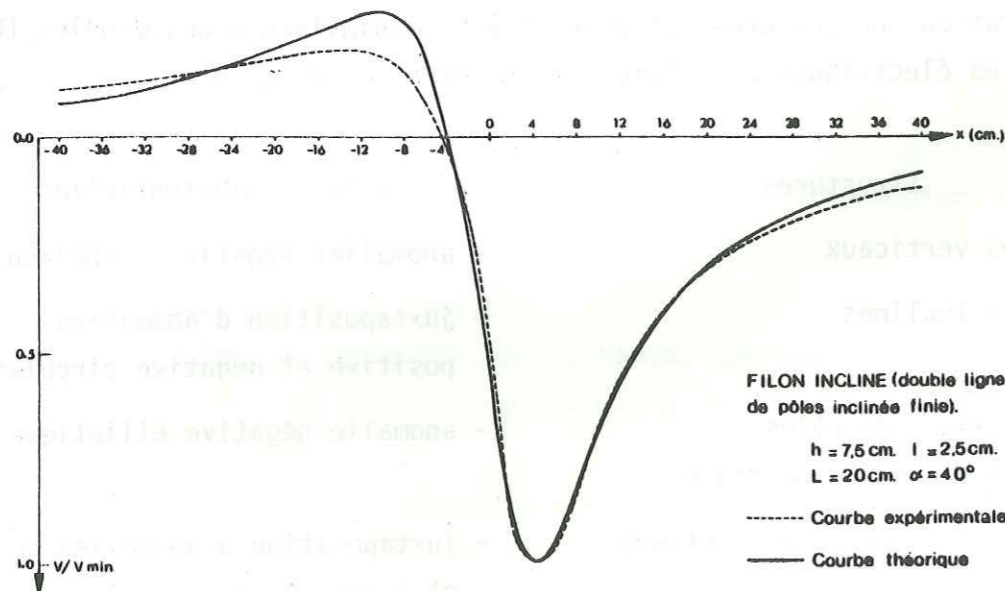
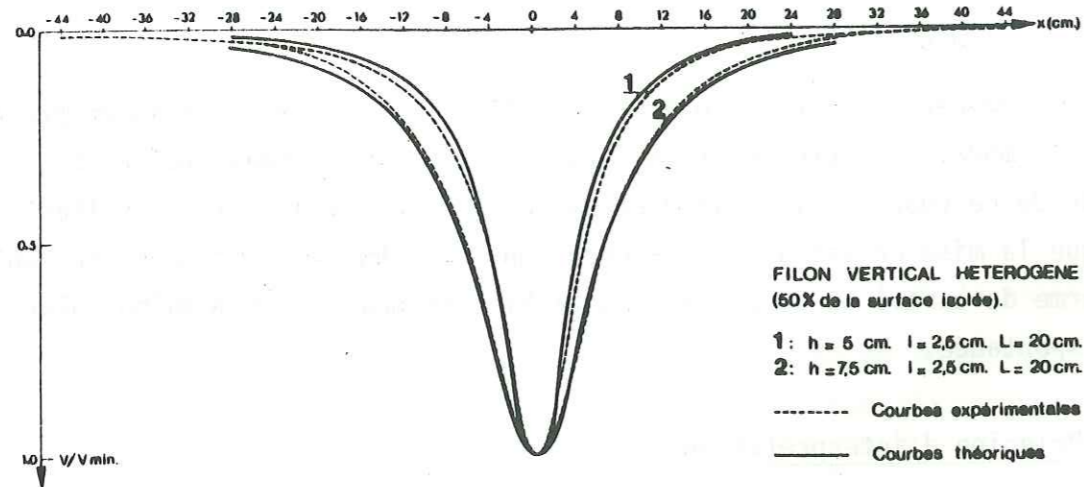
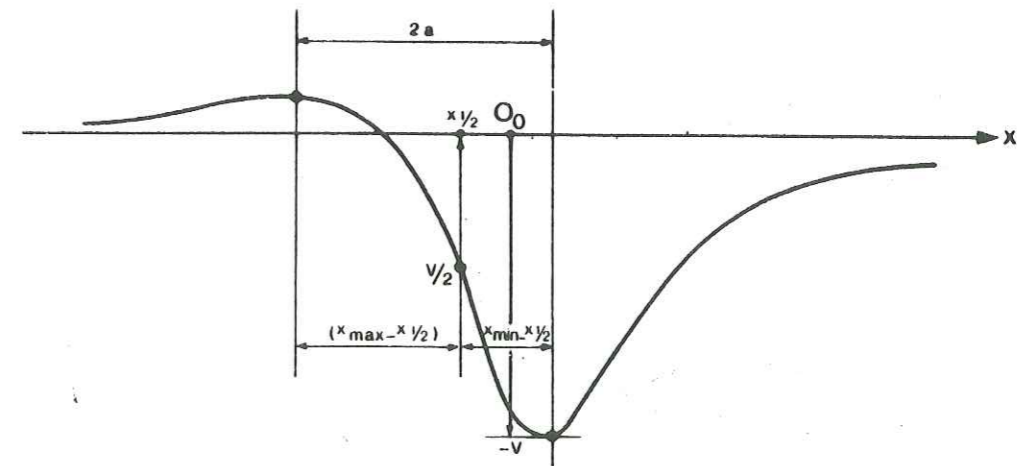


Fig. 7
Diagrammes d'interprétations pour
dipôle ou sphère polarisée inclinés
(D'après De Witte 1948)

Grandeurs nécessaires pour la méthode de DE WITTE.



$90^\circ - \alpha =$ pendage géologique des minéralisations

$h =$ profondeur

Fig. 8 - Interprétation quantitative
double ligne de pôles inclinée

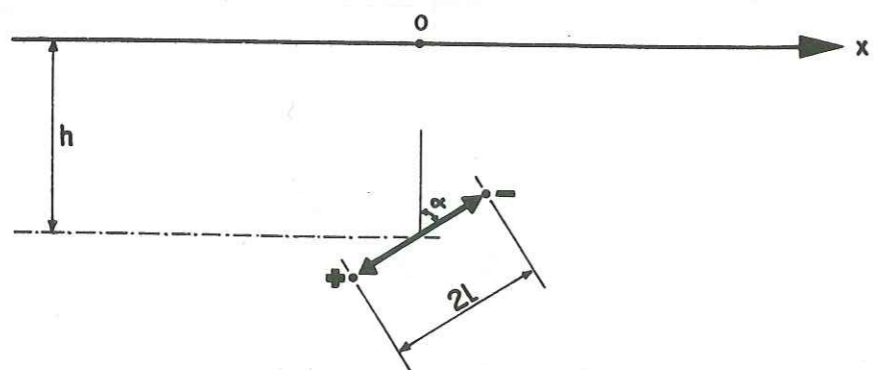
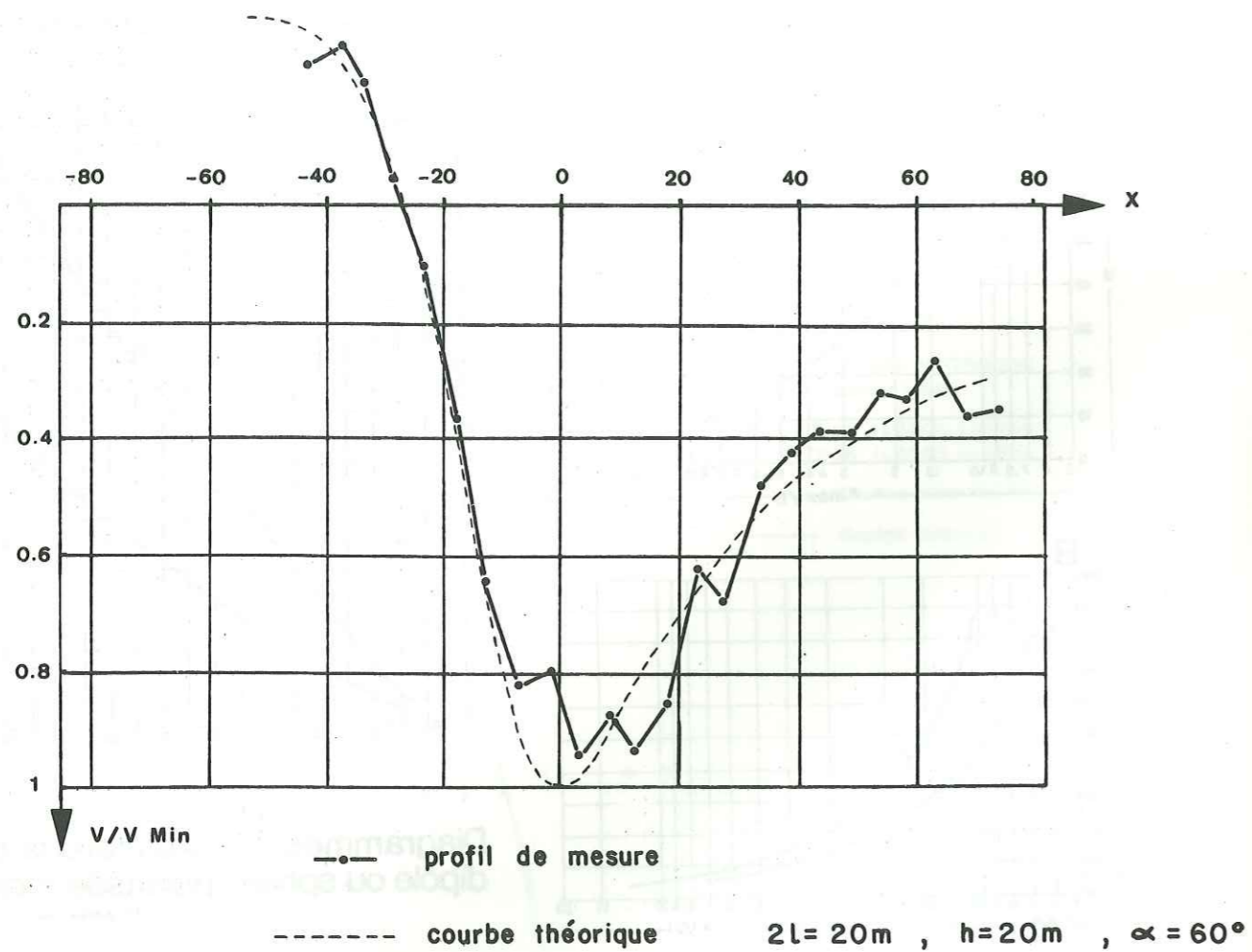
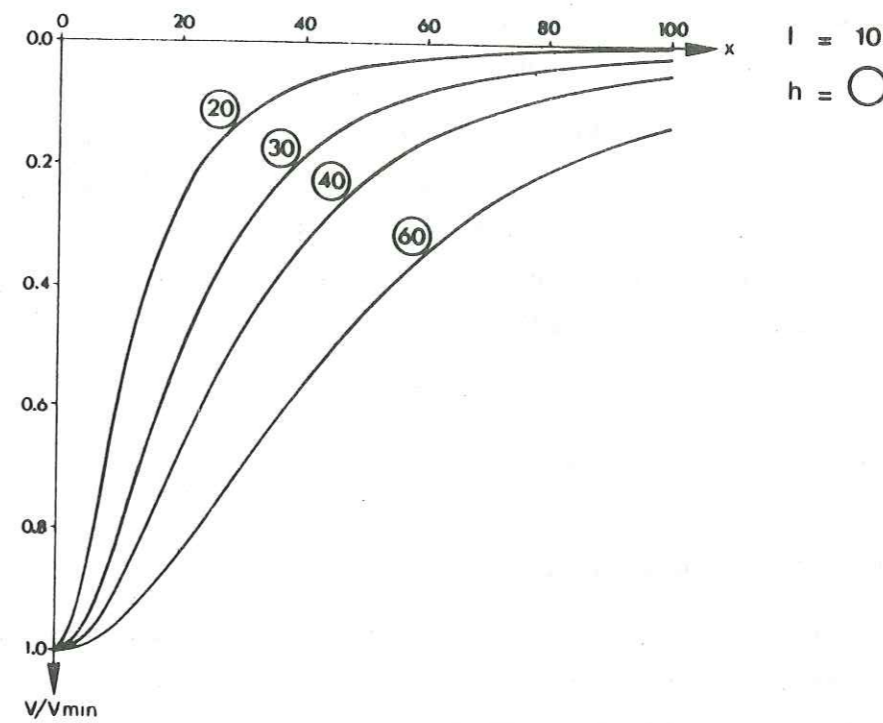
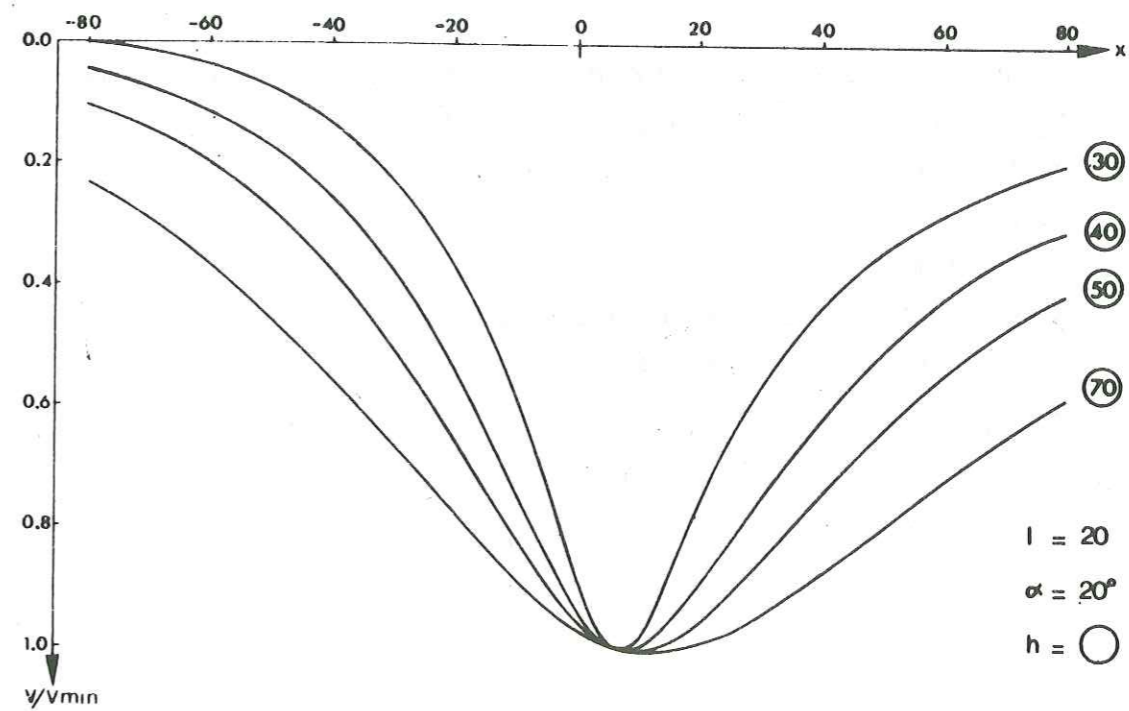


Fig. 9 - Exemples d'abaque (P. Gex, 1977)

Dipôle vertical



Dipôle incliné



Toutes les autres structures sont interprétées à partir des abaques de P. Gex (double ligne de pôle et dipôle vertical). Les interprétations s'effectuent sur des profils perpendiculaires au grand axe de l'anomalie (double ligne de pôle).

L'unité de distance choisie par x (abscisse) est celle de h (profondeur de la source) et de l (demi-longueur de la source).

La courbe d'interprétation (Fig. 8) est construite en reportant les potentiels naturels, divisés par le potentiel minimal (V/V_{\min}) du profil considéré. Le potentiel "zéro" est considéré comme étant à l'infini. Les valeurs expérimentales sont lissées et réduites aux modules des abaques. Nous superposons la courbe expérimentale à celle des abaques (Fig. 9). La position de la croix indique la projection horizontale du centre de la structure.

1.2. PROSPECTION MAGNETOMETRIQUE

1.2.1. Principes fondamentaux

Nous ne développerons pas dans cette étude le phénomène magnétique dans son ensemble. De très bons ouvrages (Reedman, 1979 ; Seguin, 1971) et de nombreux travaux sur le magnétisme (J. Pocachard, 1977 et 1980) enseignent suffisamment au géologue la compréhension du phénomène. Nous présentons ici quelques rappels fondamentaux :

- l'aimantation peut se traduire par une force d'attraction ou de répulsion qui s'exerce entre deux corps magnétiques ;
- l'aimantation des roches est due en partie à leur induction dans le champ magnétique terrestre et en partie à leur aimantation rémanente ;
- l'intensité et l'orientation de la partie induite dépendent du champ magnétique ambiant et de la susceptibilité des roches, tandis que l'intensité et l'orientation de la partie rémanente est fonction de l'histoire géologique des roches ;
- l'aimantation induite a une direction parallèle au champ magnétique ambiant et son intensité est proportionnelle à celle du champ ambiant ;
la constante de proportionnalité k est la susceptibilité magnétique :

J étant l'intensité d'aimantation, $J = k H$.

La source magnétique dont l'effet est mesuré en surface, peut être localisé en profondeur. En fonction de leurs propriétés magnétiques, certains minéraux tels la magnétite, l'ilménite, la pyrrhotite, produisent des perturbations très sensibles du champ magnétique terrestre.

1.2.2. Le magnétomètre à précession nucléaire

Cet instrument est basé sur le phénomène de résonance magnétique nucléaire. Il mesure la valeur absolue de l'intensité totale du champ magnétique.

Un champ magnétique élevé (100 fois plus fort que le champ terrestre) est appliqué par l'intermédiaire d'une bobine à un récipient contenant un liquide riche en protons (l'eau ou un hydrocarbure).

En vertu des spins magnétiques, les protons (aimants élémentaires) s'alignent parallèlement au champ appliqué.

On coupe alors le grand champ magnétique et les spins des protons exécutent une précession autour de l'axe du vecteur magnétique. Le moment magnétique des spins induit une tension dans la bobine.

Le temps que prennent les spins des protons pour retourner à leur orientation initiale, après la coupure du champ appliqué, est proportionnel à l'intensité du champ ambiant. L'intensité du champ magnétique total est obtenu avec une précision variant entre 0,1 et 5 gammas.

1.2.3. Matériel : le magnétomètre à protons

Nous avons utilisé, pour la prospection magnétique, le magnétomètre à protons portable Geometrics modèle G-826. Il est suffisamment sensible (± 1 gamma) et opère dans une gamme de 20 000 à 90 000 gammas.

Il se compose d'une console, d'un capteur et d'une perche en aluminium. Les caractéristiques de l'appareillage sont :

	dimensions	poids
console	9 x 18 x 28 cm	2,5 kg
capteur	Ø 9 x 13 cm	1,8 kg
perche	Ø 3 x 250 cm	0,9 kg

La console est transportée dans un baudrier et se place au niveau de l'abdomen. Le capteur (sensor) est accrochée en bout de la perche en aluminium.

1.2.4. Principe de prise de mesure (Fig. 10)

Nous avons adopté trois principes de mesures :

Profil simple

Sur de très longues distances (plusieurs centaines de mètres), nous suivons un cheminement (visée par boussole et repère topographique).

L'espacement entre chaque prise de mesure est variable : 5, 10 et 20 m.

Cette méthode est rapide : 400 mesures par jour. Nous avons utilisé cette méthode uniquement sur les zones déjà prospectées par polarisation spontanée. Elle permet d'établir des profils magnétiques.

Profil triple

Ce type de prospection est très supérieur au précédent. Après avoir établi le cheminement, nous effectuons trois profils parallèles. Une mesure est prise sur le trajet principal et deux autres de part et d'autre de ce trajet. L'espacement peut être réglé entre 5 ou 10 m entre les mesurés. Nous établissons ainsi une bande de trois profils à maille régulière. L'écartement entre les bandes est variable : 25, 50 ou 100 m. La progression est moins rapide que précédemment mais le résultat est beaucoup plus satisfaisant. Il est possible ainsi de construire de petites cartes isogammes : 300 mesures par jour.

Prospection à maille régulière

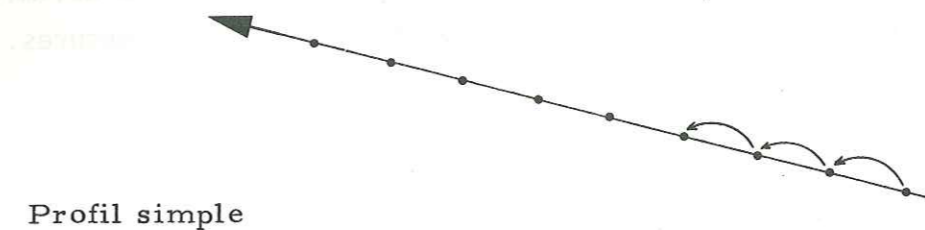
Sur les zones ayant donné des résultats positifs en profil simple, la prospection à maille régulière est indispensable pour encercler soigneusement l'anomalie.

Sur le site de La Thuile (Val Ruitor), deux zones ont été prospectées à maille régulière : une à maille de 5 m selon un rectangle de 425 m sur 260 m, soit environ 4 300 prises de mesures; l'autre à maille de 10 m selon un rectangle de 400 m sur 200 m suivant un rythme de 400 à 600 mesures par jour.

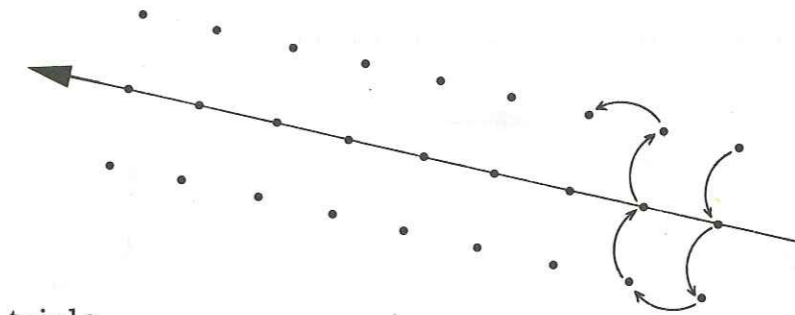
1.2.5. Mode opératoire

Il faut deux opérateurs pour une prospection en magnétométrie. Un des opérateurs prépare le cheminement et l'oriente par visées à la boussole. Il laisse filer un fil de coton relié au topofil (topofil Chaix) et marque l'espacement entre chaque point de mesure soit en repérant le fil de coton avec un feutre, soit le sol à l'aide d'une bombe de peinture. La progression et la prise de mesures peuvent se faire dans le même temps.

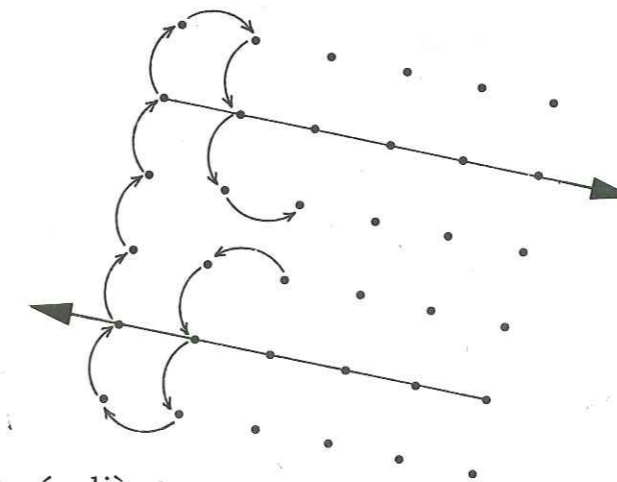
Fig. 10 - PRINCIPE DE PRISE DE MESURE .



Profil simple



Profil triple



Maille régulière

Le deuxième opérateur prend la mesure et la note. Les deux opérateurs doivent être distant de 20 m environ afin d'éviter les perturbations magnétiques apportées par la boussole ou le topofil.

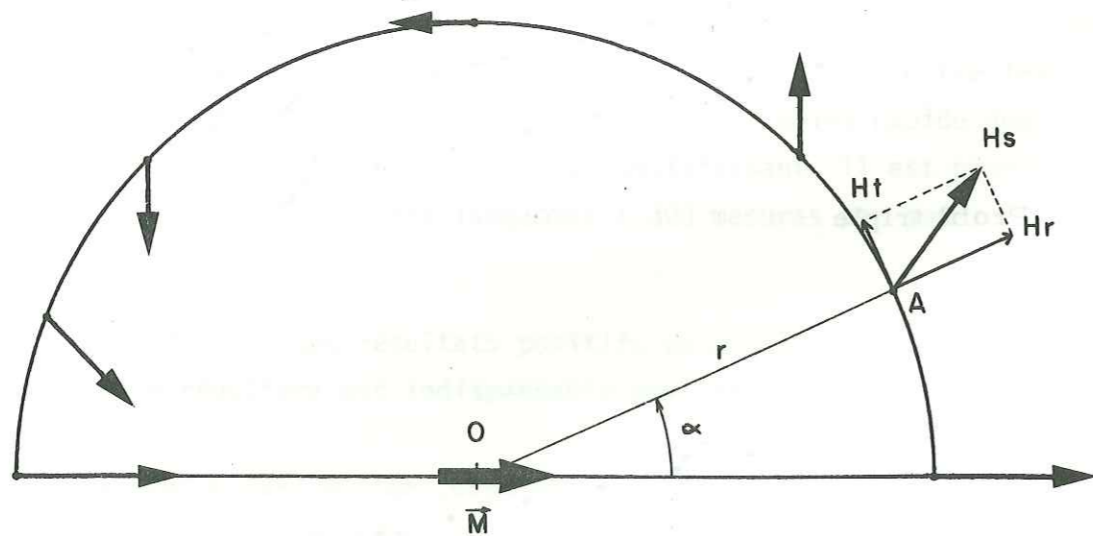
Dans le cas de la prospection à maille régulière, sur une surface délimitée, il est souhaitable de construire la maille avant de prendre les mesures.

1.2.6. Interprétation

Rappel théorique :

- Effet magnétique produit en un point A par un dipôle magnétique centré en O (Fig. 11)

Fig.11: Champ magnétique créé par un aimant:



Un dipôle de moment M et centré sur O, crée en un point A (r, α) un champ magnétique dont les composantes sont :

$$\left. \begin{array}{l} \text{radiale} : H_r = \frac{2M \cos \alpha}{r^3} \\ \text{tangentielle} : H_t = \frac{M \sin \alpha}{r^3} \end{array} \right\} H_s = H_r + H_t$$

$$H_s = H \text{ max} = H_r \text{ pour } \alpha = 0 \text{ ou } \alpha = \pi$$

$$H_s = H \text{ min} = H_t \text{ pour } \alpha = \frac{\pi}{2}$$

- Intensité d'aimantation

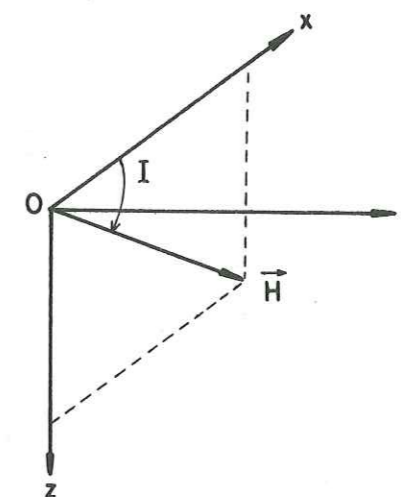
Nous définissons l'intensité d'aimantation comme suit: $J = \frac{M}{V}$, V étant le volume de l'objet placé dans un champ magnétique.

L'objet placé dans un champ magnétique H, acquiert une intensité d'aimantation J :

$$J = kH \quad k \text{ étant la susceptibilité magnétique.}$$

Sur le terrain, nous observons en dehors de toute anomalie magnétique, le champ terrestre qui peut être représenté par la figure 12 :

Fig.12: Champ terrestre H:

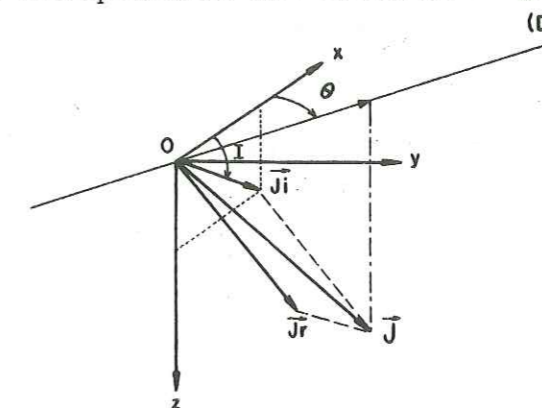


H terrestre $46\,240 \gamma = 0,4624$ oersted

I = inclinaison 60° dans notre région.

Lorsque nous nous situons sur une anomalie magnétique, nous pouvons représenter graphiquement les composantes de l'aimantation globale J par la figure 13 :

Fig. 13. Composantes de l'aimantation globale J :



L'aimantation globale résulte de la somme vectorielle d'une aimantation J_i (plan xoy) induite par le champ terrestre sur le corps et d'une aimantation \vec{J}_r propre au corps, dite rémanente :

$$\vec{J} = \vec{J}_i + \vec{J}_r$$

La direction de (D) correspond à celle de la droite passant par les + et - (par rapport au champ ambiant) de l'anomalie magnétique sur la carte d'isogammes.

Nous déduisons de la carte :

la direction de \vec{J}_i ,
la direction de \vec{J} .

Lorsque les directions de \vec{J}_i et \vec{J} sont confondues, nous pouvons admettre que $\vec{J}_i \gg \vec{J}_r$.

Lorsque Θ est grand, nous pouvons admettre que $\vec{J}_r \gg \vec{J}_i$.

J nous renseigne sur la susceptibilité magnétique de la substance.

A partir de ces quelques bases, nous interprétons les profils et les cartes magnétiques en fonction de leur forme, de leur amplitude et de l'écartement des pôles de signes opposés.

Nous nous aidons également des modèles établis expérimentalement par le groupe GAMCIS (LETI CEN GRENOBLE) (Fig. 14a et b).

1.3. TRAITEMENT DES DONNEES

Le nombre des données obtenu en fin de mission est considérable :

profil : 6 000 données polarisation spontanée
3 000 données magnétométrie

carte : 500 données polarisation spontanée
7 000 données magnétométrie

Le traitement par ordinateur a été apprécié pour sa rapidité dans l'élaboration des cartes d'équipotentiellles et d'isogammes, ainsi que pour la construction des différents profils à diverses échelles.

Fig. 14a - Distance point de mesure - source magnétique:
(J. Pocachard)

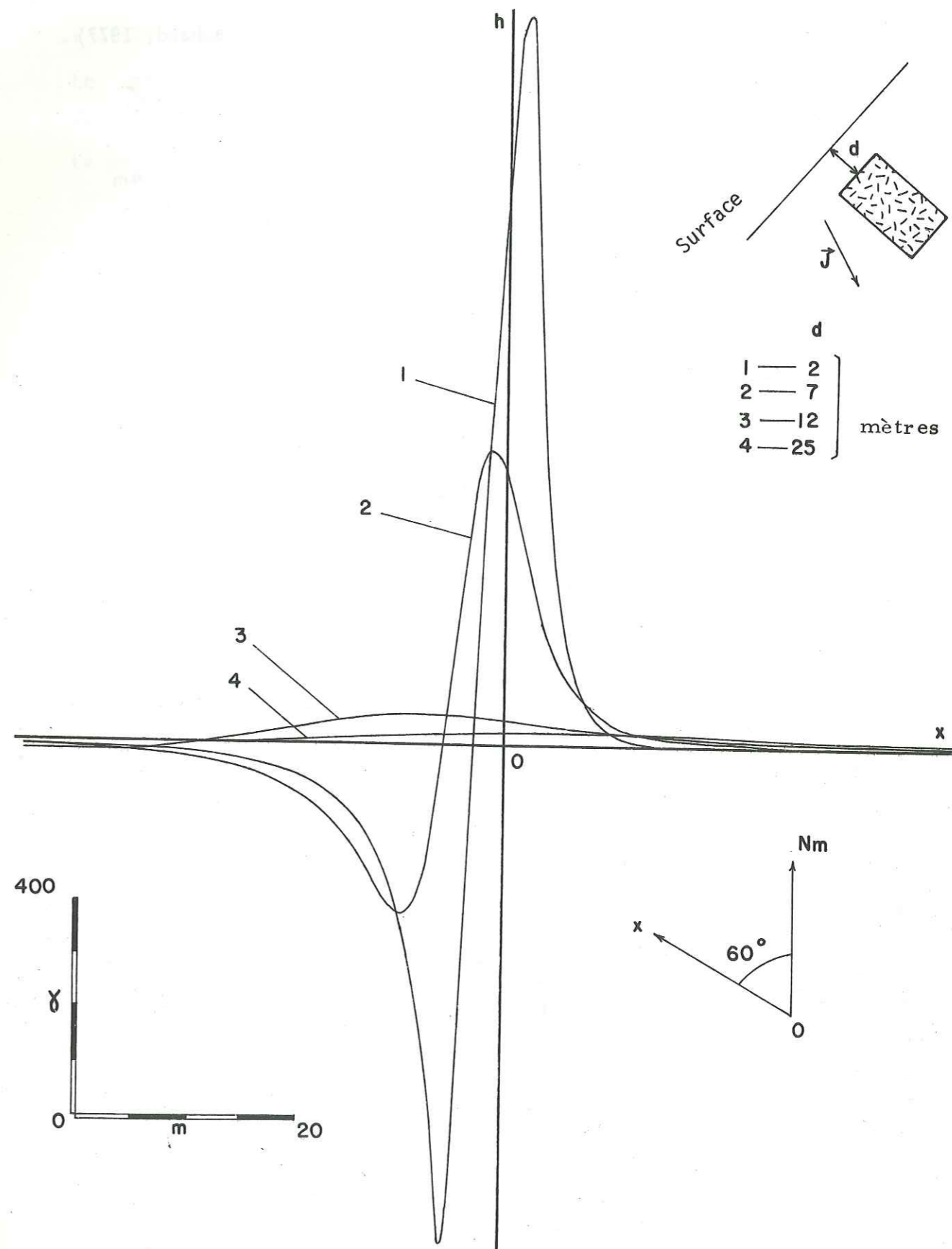
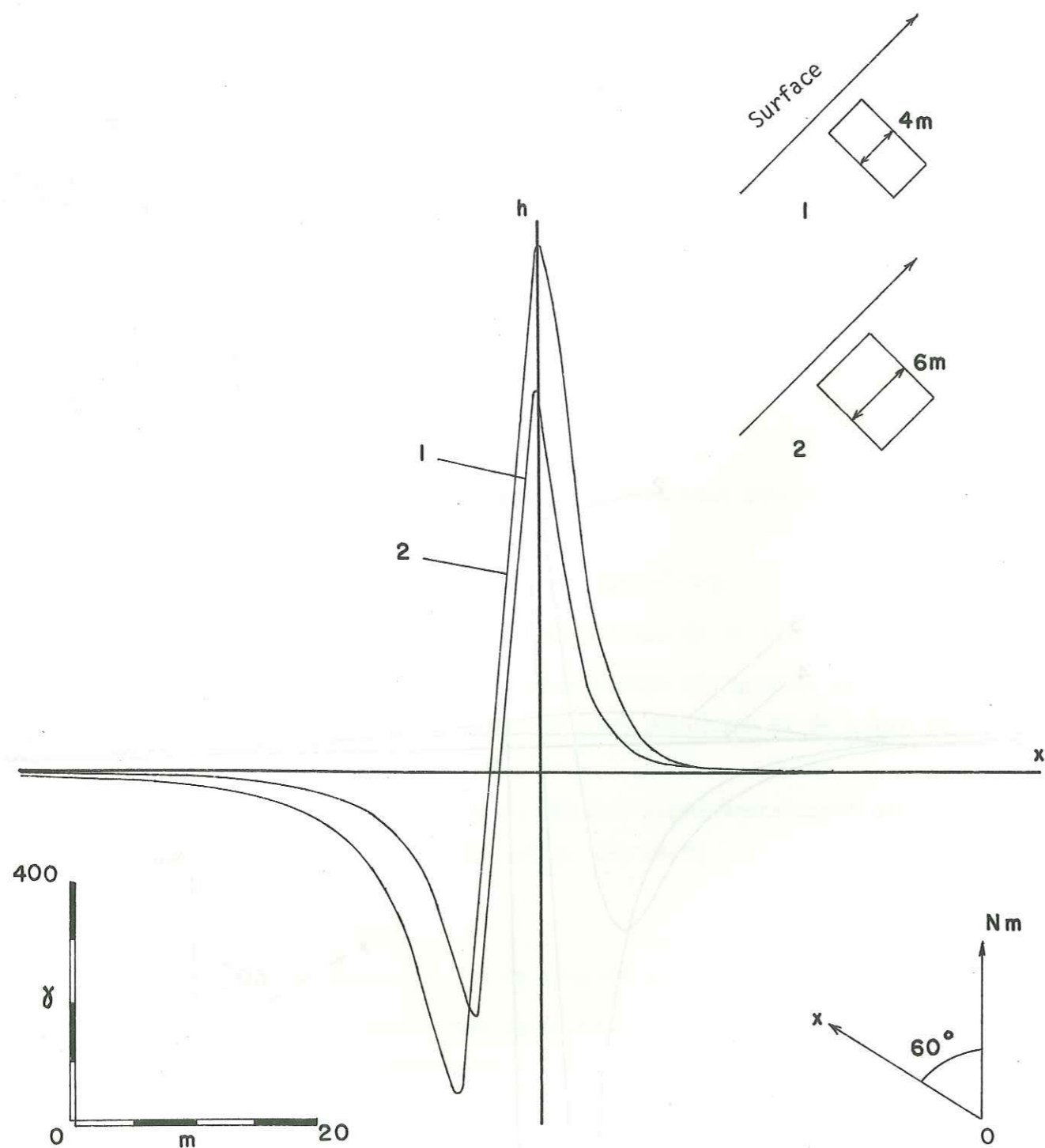


Fig. 14b - Puissance de la structure minéralisée: (J. Pocachard, 1977)



• Profils polarisation spontanée et magnétométrie.

Le groupe GAMCIS a mis au point différents modes de représentation de profils, qu'ils soient de polarisation spontanée ou de magnétométrie.

Le problème est de représenter tous les profils, liés à une prospection donnée, sur un même cadre, en mettant en valeur toutes les anomalies.

La représentation linéaire, habituellement utilisée, peut être rendue illisible par le chevauchement des courbes (fortes amplitudes) ou bien par un trop grand nombre de variations des courbes.

Dans ce cas, nous transformons la courbe par voie mathématique.

En utilisant l'ordinateur et la table traçante sur un même profil fictif, nous proposons quatre modes de représentation (Fig. 15) :

- Mode Valeur-Linéaire

Représentation employée communément et indispensable pour l'interprétation quantitative d'une anomalie (distance en abscisse et γ ou mV en ordonnée).

- Mode Valeur-Logarithme

Permet de mettre en valeur les faibles amplitudes au détriment des fortes. L'inconvénient de ce mode est qu'il estompe les petites anomalies situées sur les grosses.

- Mode Différentielle-Linéaire

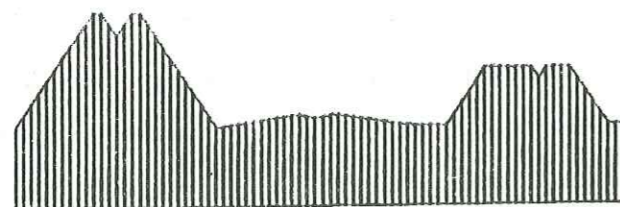
Représentation de la dérivée de la courbe.

Ce mode permet de mieux visualiser chaque anomalie par un dédoublement des pics anomaux. L'exemple pris ici est défavorable pour le mode différentielle-linéaire car les courbes sont symétriques et les pentes constantes. Dans le cas des profils obtenus sur le terrain, l'allure des courbes est nettement plus désordonnée et ce mode peut devenir intéressant.

- Mode Différentielle-Logarithme

Ce mode met en valeur les petites anomalies noyées dans les fortes amplitudes et dans les faibles amplitudes.

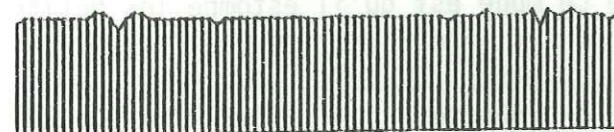
Fig. 15 - REPRESENTATION GRAPHIQUE .



Mode VALEUR - LINEAIRE



Mode VALEUR - LOGARITHME



Mode DIFFERENTIELLE - LINEAIRE



Mode DIFFERENTIELLE - LOGARITHME

•Cartographie

La cartographie magnétique et électrique consiste à tracer des lignes isogammes et équipotentielles.

Le programme informatique est capable de tracer une carte à partir d'une maille régulière carrée ou rectangulaire.

La représentativité de la carte dépend de la densité de points mesurés. Dans le domaine minier, la densité minimale des points de mesures est de 500 à 1 000 points par hectare.

Le traitement des données se fait par interpolation des valeurs en fonction de quatre points linéaires.

CHAPITRE II

PROSPECTION GEOCHIMIQUE

2.1. DEFINITION PRINCIPE

La prospection géochimique consiste à mesurer des paramètres chimiques dans les matériaux naturels (roches, sols, stream sediments, végétaux, air, eaux souterraines ou de surface). Le but principal est la recherche d'anomalies liées à une minéralisation. Il est nécessaire pour cela de déterminer la teneur de fond des éléments du matériau étudié et le seuil d'anomalie correspondant.

Nos recherches, localisées essentiellement dans les régions de Cogne, La Thuile et Gressoney-Ayas, ont pour support le prélèvement de roches, de stream sediments, de sols et de batées.

2.2. LES DISPERSIONS GEOCHIMIQUES

2.2.1. La dispersion primaire

Définie comme la répartition des éléments lors du cycle géochimique, elle se traduit par la concentration des éléments dans les roches non altérées (Tableau 1).

Elle peut être utilisée directement en prospection mais les difficultés inhérentes au matériau choisi (représentativité de l'échantillon, obligation de broyer la roche pour l'analyse) en font une méthode coûteuse et difficile. Toutefois, il est très utile, pour l'interprétation des résultats des autres méthodes de prospection (sols, stream sediments), de connaître les concentrations dans les différents types de roches. Ceci permet de discriminer les anomalies dues à une minéralisation de celles liées à des roches non minéralisées à teneur de fond élevée (anomalies formationnelles).

2.2.2. La dispersion secondaire

Lors de l'altération, les processus physiques et chimiques provoquent la dispersion des éléments depuis les roches saines vers les différents produits d'altération ; le degré de dispersion d'un élément s'exprime par sa mobilité. Les facteurs responsables de ce phénomène sont principalement d'ordre chimique, mécanique et biogénique.

2.2.2.1. Processus chimiques

Sous l'influence des agents d'altération, les constituants des roches passent en solution dans les eaux souterraines ou de surface et se redéposent par effet d'adsorption ou de variation du pH de l'eau.

Le terme d'adsorption traduit la faculté qu'ont les argiles, les matières organiques, les hydroxydes de fer et de manganèse de fixer les ions métalliques. Applications : prospection hydrogéochimique, sols et stream sediments.

Toutefois, pour ces deux derniers matériaux, les études récentes (Laville - Timsit, 1979) démontrent le rôle mineur de l'adsorption par rapport au processus mécanique.

2.2.2.2. Processus mécaniques

Le principal agent est la gravité. Elle permet par l'intermédiaire des sols, de l'eau et des glaciers, des déplacements parfois très longs des minéraux. Les prospections par batées et stream sediments sont basées sur ce phénomène.

2.2.2.3. Processus biogéniques

Les plantes, au cours de leur croissance, accumulent les éléments contenus dans les sols. Au moment de la destruction de la plante, les éléments les plus solubles passent en solution, les moins solubles se concentrent dans les sols.

Ce mécanisme est responsable en partie de l'enrichissement en éléments métalliques des sols. Certaines études portent principalement sur les relations entre la nature géologique du sol et la composition chimique des feuilles ou des plantes (biogéochimie).

2.3. PROSPECTION GEOCHIMIQUE PAR PRELEVEMENTS DE ROCHES

2.3.1. Echantillonnage

La récolte des échantillons de roches ne pose pas de véritables problèmes, si ce n'est la représentativité de l'échantillon et sa fraîcheur.

L'échantillonnage que nous avons effectué se rapporte à cinq groupes de roches : (Fig. 18)

- échantillons de la mine de Cogne ;
- échantillons des indices de magnétite de la zone de Zermatt, Saas-Fee ;
- Amphibolites, prasinites, micaschistes des schistes lustrés ;
- échantillons des indices cuprifères (Hérin - Petit-Monde) ;
- échantillons de la région de La Thuile.

2.3.2. Méthodes d'analyse chimique

Les analyses de roches ont été effectuées au Laboratoire Central d'Analyse et de Contrôle du Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble ; ce travail a nécessité l'emploi de trois méthodes d'analyse :

- la fluorescence X,
- la spectrométrie d'émission,
- l'activation neutronique.

Il nous a été possible de participer activement (préparation des échantillons et dépouillements des résultats), en collaboration avec MM. Florestan et Journet, aux analyses réalisées au sein des laboratoires de fluorescence X et de spectrométrie d'émission. Le groupe de Radioactivation Analytique s'est chargé des analyses par activation neutronique.

2.3.2.1. La fluorescence X

2.3.2.1.1. Principe

Un rayonnement X primaire, issu d'un tube à rayons X, irradie l'échantillon où il provoque l'émission d'un rayonnement de fluorescence X secondaire, caractéristique des éléments qui ont été excités.

Ce faisceau secondaire est dirigé sur un cristal analyseur qui pivote autour d'un axe fixe. Toutes les radiations sont ainsi diffractées en fonction de leur longueur d'onde, selon la relation de Bragg, $n \lambda = 2 d \sin \theta$.*

Les rayons diffractés sont détectés par un compteur à scintillation qui se déplace autour du cristal à une vitesse deux fois plus grande. Les impulsions sont mises en mémoire dans un ordinateur.

L'identification des éléments se fait à partir de la mesure des longueurs d'onde des radiations détectées.

Pour analyser quantitativement un échantillon, les enregistrements d'intensité sont comparés à ceux obtenus sur des échantillons de composition connue (construction de la courbe d'étalonnage).

2.3.2.1.2. Appareillage

L'appareil utilisé est un spectromètre multicanal TELSEC XRF. Cet appareil permet le dosage simultané de 21 éléments et le passeur d'échantillons automatique à 50 logements permet une rapidité d'analyse très supérieure à celle d'un appareil de type séquentiel.

Les échantillons et les étalons sont en général répartis de façon égale (25 + 25) sur le passeur d'échantillons.

Le temps d'irradiation de chaque échantillon est de 100 secondes. Le dépouillement des résultats s'effectue après le passage des 50 échantillons.

2.3.2.1.3. Préparation des échantillons

Ils sont préparés à partir d'un mélange de poudre de roches (1 g), de B_2O_3 (2 g), de $Li_4B_4O_7$ (4 g) et de NaBr (0,1 g). La fusion du mélange s'effectue dans des creusets en platine rhodié à l'aide d'un appareil agitateur à six brûleurs

* λ = longueur d'onde
d = distance inter-réticulaire
 θ = angle de réflexion sélective

à gaz qui permet la fabrication de six perles en une demi-heure.

2.3.2.1.4. Eléments analysés

21 éléments peuvent être analysés simultanément :

Fe, Cr, Mn, Si, Mg, Al, P, Cu, Ti, Sn, Ca, As, Zr, Mo, Zn, S, Hf, V, Ni, K, Co.

2.3.2.1.5. Etalons utilisés

Ils sont de deux types :

- les étalons standards provenant soit du C.R.P.G. de Nancy, soit de l'U.S.G.S. ;
- les étalons fabriqués en laboratoire.

2.3.2.1.6. Dépouillement des résultats

Le calcul des concentrations est basé sur le fait que les intensités de fluorescence sont proportionnelles à la concentration de l'élément.

Après introduction des valeurs des étalons, l'ordinateur calcule les concentrations et les compare aux concentrations théoriques. Ce calcul s'effectue en tenant compte des effets inter-éléments qui se produisent lors du phénomène de fluorescence.

L'écart quadratique moyen absolu* permet d'estimer la validité de la courbe d'étalonnage.

2.3.2.2. La spectrométrie d'émission

L'échantillon à analyser, mélangé en proportion égale avec du graphite est excité par un arc électrique provoqué.

Les radiations émises, de longueur d'onde caractéristique, sont dispersées par un prisme et impressionnent une plaque photographique. Le domaine spectral reproduit s'étend de 2 000 à 8 000 Å.

L'arc électrique est provoqué par un courant continu, entre deux électrodes de graphite séparées de 4 mm, d'intensité 10 ampères, sous une tension de 220 volts. Le temps d'irradiation est de 50 secondes.

* Voir définition dans l'annexe 1

Les spectres de 10 échantillons, dont un standard, sont impressionnés sur une même plaque photographique. Le spectre de l'échantillon standard (petit barreau de fer) sert de référence lors du dépouillement des plaques.

Les dosages quantitatifs sont possibles en utilisant plusieurs étalons ; les concentrations, proportionnelles au noircissement de la plaque sont déduites visuellement ou à l'aide d'un microphotomètre (Fig. 16).

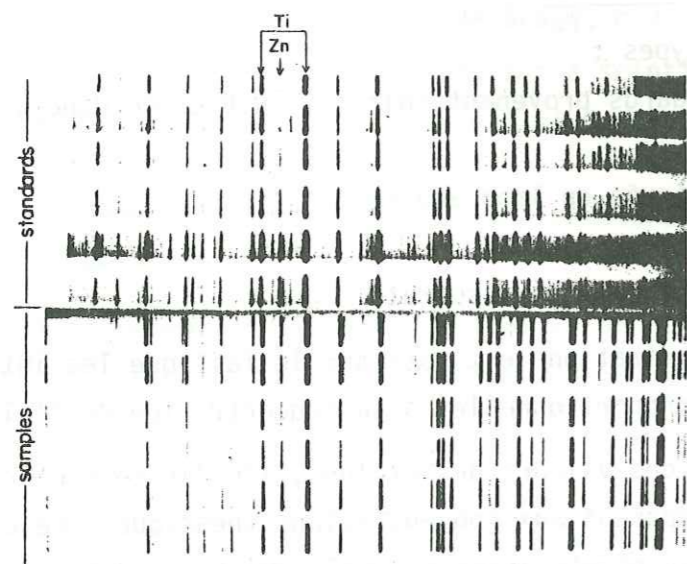


Fig. 16 - Plaque photographique (Reedman, 1979)

- Eléments analysés

Ag, Na, As, B, Ba, Cd, Mo, Pb, Rb, Sn, Sr, Zn, Li, Be, Cs.

2.3.2.3. Activation neutronique

Cette technique efficace, est d'une sensibilité élevée et d'une grande précision et sert à l'identification et le dosage d'un grand nombre d'éléments.

2.3.2.3.1. Principes théoriques

Lorsqu'un matériau à analyser est bombardé par un flux de neutrons, produit dans un réacteur nucléaire, la plupart de ses constituants se transforment en radio-isotopes artificiels, dont l'activité induite est directement proportionnelle à la masse de l'élément irradié.

L'identification des radio-isotopes s'effectue grâce à leurs caractéristiques :

- période de décroissance radio-active ;
- nature et énergie des rayonnements émis ;
- caractéristiques quantitatives et qualitatives des différentes raies dans les spectres γ .

2.3.2.3.2. Eléments analysés

Ag, As, Sb, Au, La, Co, Eu, Tb, Lu, W, Te, Ir, Os, Co, Cr, U, Br, Nb, Ta.

2.3.3. Méthodes d'interprétation

Les interprétations des résultats ont nécessité l'emploi de méthodes statistiques mono et multivariées (analyse en composantes principales).

Les notions et définitions statistiques utilisées dans ce mémoire sont exposées dans l'annexe 1.

2.4. LA PROSPECTION GEOCHIMIQUE PAR PRELEVEMENTS DE SOLS

2.4.1. Comportement des métaux dans la zone d'oxydation supergène des minéralisations sulfurées

Les résultats obtenus par Wilhelm et Laville-Timsit (1977), ont permis de définir les principales phases-support des métaux dans la zone d'oxydation supergène de la minéralisation et de préciser leurs mécanismes de transport.

A côté des oxydes secondaires stables (malachite, molybdite), ces phases-support sont pour l'essentiel les hydroxydes de fer et les matières organiques.

Les hydroxydes de fer constituent le piège préférentiel des métaux issus de la minéralisation sulfurée. L'enrichissement des hydroxydes en métaux utiles est un phénomène qui se produit en roche, par dissolution et précipitation des éléments sur place.

Par érosion du profil d'altération, les hydroxydes riches en métaux utiles sont ensuite dispersés par voie mécanique dans l'environnement du gîte.

Dans les secteurs où les matières organiques sont abondantes, elles peuvent former des complexes organo-métalliques qui retiennent et/ou concentrent une partie des métaux d'origine sulfurée.

Ces résultats ont été confirmés sur plusieurs prospectifs étudiés en France.

2.4.2. Dispersion des éléments autour des gisements sulfurés

Nous avons parlé de dispersion mécanique des hydroxydes riches en métaux utiles. Mais il existe d'après Govett, Goodfellow et Whitehead (1976) certaines évidences pour que la dispersion d'éléments autour d'un corps sulfureux puisse être influencée par les champs électriques associés aux sulfures.

Par exemple, autour d'un corps graphiteux où il n'y a pas de confusion apportée par la dissolution de sulfures, il existe une zone relativement acide, riche en cations dérivée de l'encaissant, au sommet du corps et une zone relativement basique, avec une concentration pauvre en cations, à la base du corps. Dans le cas de corps sulfurés polymétalliques, un sommet acide et un fond relativement moins acide peuvent être détectés (phénomène de polarisation spontanée en prospection électrique).

La dispersion des métaux autour des corps sulfurés dépendra des potentiels relatifs des minéraux sulfurés et de la solubilité des espèces, permettant la formation de cations et de complexes anioniques, ainsi que de l'humidité de l'environnement.

Les expériences faites en laboratoire montrent une analogie entre la distribution des éléments dans les différentes matrices artificielles et la distribution des éléments trouvés dans l'encaissant des gisements sulfurés volcano-sédimentaires.

Etant donné que dans les expériences la situation est statique (sans mouvement de solution, ni fluide hydrothermal chaud), la distribution doit être attribuée au seul mouvement lié aux gradients chimiques, électrique et au pH.

Les distances que peuvent parcourir les éléments sont encore mal connues.

2.4.3. Echantillonnage

Le sol est prélevé à 30 cm de la surface, à l'aide d'une pelle, d'une tarière ou bien simplement d'un marteau-pioche. 500 g de sol sont prélevés. Avant d'envoyer les échantillons pour l'analyse, il est préférable d'effectuer un pré-tamassage jusqu'à 300 μm .

2.4.4. Analyse

Le Cu, Pb, Zn et Ag, ont été analysés par un laboratoire anglais : LEA CROSS GEOPHYSICAL.

2.5. PROSPECTION GEOCHIMIQUE PAR PRELEVEMENTS D'ALLUVIONS

2.5.1. Stream sediments

2.5.1.1. Echantillonnage

Lors d'une campagne de prospection, il est indispensable de définir en premier lieu la maille de prélèvement des échantillons. Elle est gouvernée par la densité du réseau hydrographique et par la surface à prospecter ; elle varie de un échantillon par km^2 , à un pour 10 km^2 de bassin versant, dans le cas d'une prospection régionale. L'échantillonnage s'effectue en remontant le cours d'eau principal et les affluents si possible. Si cette méthode n'est pas réalisable, il est recommandé d'échantillonner avant et après chaque confluence. La récolte de l'échantillon se fait dans le lit vif du ruisseau, de préférence à une profondeur d'eau de 20 cm au moins.

Il faut éviter les zones trop turbulentes, mais préférer des replats où l'eau est plus ou moins stagnante et ne pas prélever dans les zones trop riches en débris végétaux. Il est possible, dans le but de réduire sensiblement le nombre d'échantillons et d'augmenter la représentativité de ceux-ci, de procéder à l'échantillonnage de façon composite, c'est-à-dire en prélevant plusieurs stream sediments pour un même échantillon.

Nous avons gardé pour l'analyse la fraction inférieure à 125 μm ; toutefois les études récentes (Laville-Timsit, 1980) montrent que l'étude des fractions supérieures peut se révéler intéressante.

Il est donc prudent de conserver les restats des stream sediments dans l'optique d'études ultérieures.

Un échantillon de 300 g suffit, si le site est riche en matériaux fins, ce qui est parfois difficile à trouver le long des ruisseaux trop turbulents.

Un séchage à l'étuve, un tamisage et un quartage préparent l'échantillon à analyser.

2.5.1.2. Analyse

Toutes les analyses chimiques des stream sediments ont été réalisées par un laboratoire canadien, BARRINGER MAGENTA, par la méthode de la "torche à plasma".

Les éléments dosés sont :

Al, Ca, Mg, Na, K, P, Mn, Fe, Ti, Be, Cr, Co, Cu, Pb, Ni, Sr, Th, Zr, V, Zn, Mo, Ag.

2.5.1.3. Méthodes d'interprétation - Traitement des données

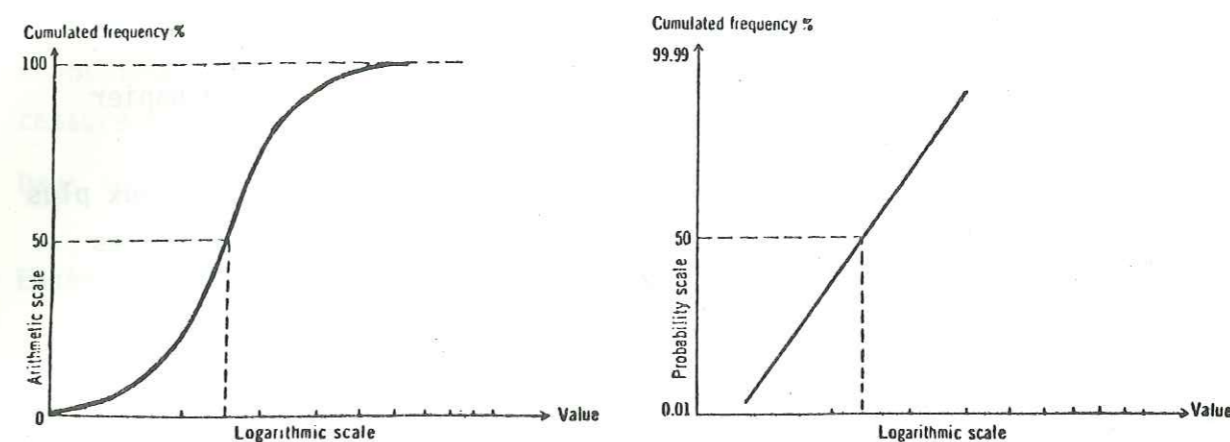
Le développement de l'utilisation des ordinateurs, permet d'employer des méthodes statistiques multivariées (analyse en composantes principales normées). Cependant elles ne se justifient que pour l'étude des associations d'éléments et de leurs dépendances avec le contexte géologique local. Pour la recherche et la signification des anomalies, une approche statistique plus simple est suffisante ; la méthode décrite ci-dessous est emprunté à C. Lepeltier (1969).

2.5.1.3.1. Traitement statistique simplifié des données géochimiques

2.5.1.3.1.1. Distribution des éléments

Ahrens (1957) a montré que les éléments traces dans les roches sont distribués selon une loi log-normale. Cela se traduit par le fait que les logarithmes des teneurs sont distribués normalement (Fig. 17).

Fig. 17 : Exemple de distribution log-normale (Lepeltier, 1969).



Cette loi décrit, dans de nombreux cas, la distribution des éléments en traces dans les stream sediments. Les propriétés de la loi normale* permettent de déterminer graphiquement les paramètres statistiques (teneur de fond, seuil d'anomalie) de chaque élément en traces.

2.5.1.3.1.2. Construction de la courbe des fréquences cumulatives

Marche à suivre :

- Sélection d'une population aussi large et homogène que possible. Le nombre minimal d'échantillons est de 25.
- Groupement des valeurs par classes
En règle générale, la largeur d'une classe, exprimée logarithmiquement, doit être prise égale ou inférieure à la moitié de l'écart type. (1964).

La largeur de l'intervalle est fonction de :

R = domaine de distribution ou rapport de la plus forte valeur sur la plus faible. Dans les stream sediments, il varie de 6 à 300.

n = nombre de points nécessaires pour construire une courbe correcte (de 10 à 20).

Ces deux variables sont liées par la relation :

$$\text{Log Intervalle} = \frac{\text{Log } R}{n}$$

* Cf. Annexe 1 : Rappels statistiques

Les variations de R et n déterminent pour Log Int, une variation de 0,039 à 0,25. La valeur généralement choisie est de 0,10, mais si la dispersion est très réduite on utilise 0,05.

- La courbe des fréquences cumulatives est construite à l'aide de papier gaussien-logarithmique.

Les fréquences sont cumulées depuis les plus fortes valeurs jusqu'aux plus basses, car du fait de l'utilisation d'une échelle de probabilité, les fréquences 0 % et 100 % sont rejetées à l'infini.

Les fréquences sont reportées aux limites inférieures des classes.

Informations données par les courbes de fréquences cumulées

. Teneur de fond (background) = b.

b est donné par l'intersection de la droite ayant comme ordonnée 50 %

. s = écart type (standard deviation)

s exprime la dispersion des valeurs autour de b.

D'après les propriétés de la loi normale, si b est la moyenne et s l'écart-type, nous avons :

- 68,26 % de la population compris entre $b + s$ et $b - s$

- 95,44 % de la population compris entre $b + 2s$ et $b - 2s$

- 99,74 % de la population compris entre $b + 3s$ et $b - 3s$

s se lit sur l'axe des abscisses pour une probabilité de 16 % $= \frac{100 - 68}{2} \%$

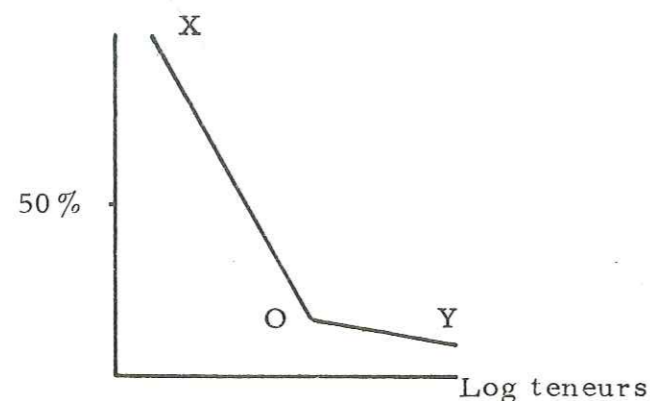
. t = seuil d'anomalie (threshold level).

Cette limite, au-dessus de laquelle les valeurs sont considérées comme anomalies, se lit sur l'axe des abscisses pour une probabilité de 2,5 %

$$= \frac{100 - 95}{2} \%$$

Cas complexes

. Excès de valeurs fortes.



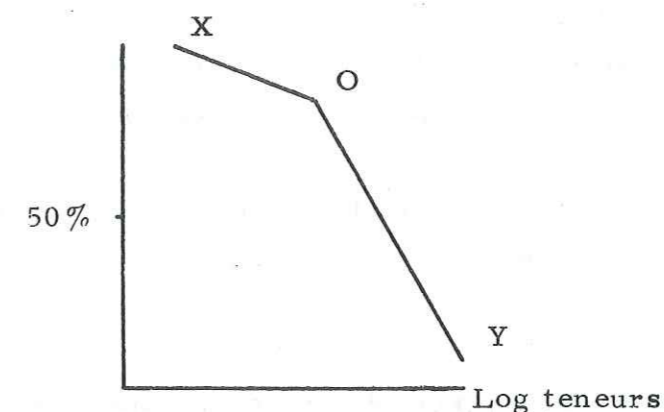
L'excès de valeurs fortes provoque une cassure dans la droite.

Dans ce cas, la teneur de fond et l'écart type sont calculés sur OX.

L'abscisse correspondant à 0 peut être prise comme seuil d'anomalie si la cassure se situe au-dessus du point correspondant à 2,5 %.

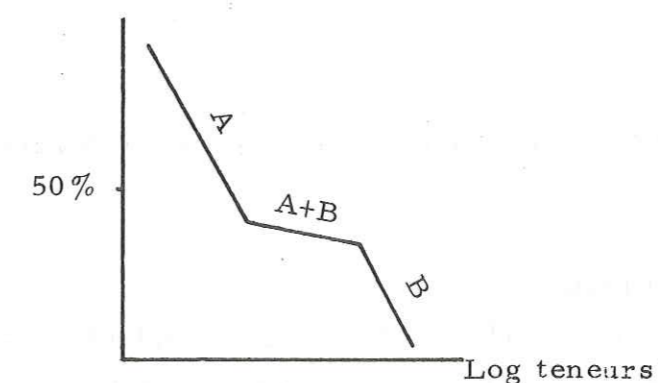
Dans le cas contraire, t est calculé comme d'habitude.

. Excès de valeurs faibles.



Si la proportion est faible (- de 20 %), nous pouvons ne pas en tenir compte. Les paramètres b et t sont calculés sur OY.

. Mélange de deux populations.



Le mélange de deux populations se traduit par deux cassures sur la courbe.

Si le milieu de A + B se situe au-dessous de 20 %, nous calculons b sur A et t est pris au milieu de A + B.

Si le milieu de $A + B$ est situé au-dessus de 10 %, il faut séparer la population totale en deux sous-populations a et b.

2.5.1.3.2. Tracé des cartes

- Carte de données brutes

Si ce type de représentation permet de rendre compte de la valeur absolue des teneurs, elle est d'une lecture peu facile et surtout ne tient pas compte du mode de distribution des éléments et ne visualise pas les anomalies et les zones anomaliques.

Nous l'avons utilisé pour les éléments rarement détectés dans les analyses chimiques (Ag, Mo, Cd) ; ceci interdit le calcul de la teneur de fond et du seuil d'anomalie.

Elle est toutefois nécessaire à l'élaboration des cartes de moyennes mobiles dans le cas de prospection à maille régulière.

- Cartes d'anomalies

Ces cartes sont dressées à partir des résultats statistiques obtenus sur les variables (cf. paragraphe 1.2.4.1.2.1.).

Les échantillons sont séparés en cinq sous-groupes en fonction de leur teneur par élément :

$$X \leq b$$

$$b < X \leq b + s$$

$$b + s < X \leq b + 2s$$

$$b + 2s < X \leq b + 3s$$

$$b + 3s < X.$$

Ce mode de représentation visualise très bien les échantillons et les zones anomaliques.

- Carte de moyenne mobile

Les cartes de moyennes mobiles sont utilisées surtout dans le cadre d'une prospection régionale pour définir les tendances générales. Elles permettent de lisser les irrégularités dues à l'échantillonnage et de discriminer parfois les anomalies dues à une minéralisation de celles dues à une roche non minéralisée à teneur de fond élevée.

Technique de construction.

La technique consiste à placer un carré (= fenêtre) sur la carte des données brutes, à calculer la moyenne des teneurs des échantillons contenus dans le carré et à la reporter au centre du carré. La fenêtre est ensuite déplacée sur toute la carte et la moyenne est calculée et reportée pour chaque position.

Deux positions successives du carré comportent une surface commune appelée recouvrement.

Le recouvrement peut être de 50 %, $33\frac{1}{3}$ % ou 25 %.

Si l'élément est distribué selon une loi log normale, on utilise la moyenne géométrique.

2.5.2. Prospection alluvionnaire par batée

La campagne de prospection par batée effectuée dans le Val d'Aoste a permis l'étude de 86 concentrés.

La maille de prélèvement était large étant donné le caractère régional de cette prospection : l'espacement entre deux points de prélèvements était de l'ordre de 1 à 2 km. L'échantillon était séché sur place puis emballé afin d'éviter les oxydations ultérieures qui gênent considérablement les déterminations.

Nous avons effectué l'étude préliminaire des concentrés (lampe à ultra violet, microscope, radiocristallographie) ; le laboratoire du B.R.G.M. se chargeant des reconnaissances et estimations quantitatives des minéraux suivants :

- | | |
|-----------------|---------------|
| - Chalcopryrite | - Hématite |
| - Or natif | - Limonite |
| - Pyrite | - Chromite |
| - Marcasite | - Molybdénite |
| - Barytine | - Cuivre gris |
| - Sphène | - Malachite |
| - Tourmaline | - Réalgar |
| - Zircon | - Scheelite |
| - Apatite | - Galène |
| - Rutile | - Blende |
| - Anatase | |
| - Ilmenite | |
| - Magnétite | |

Une carte de répartition des principaux éléments métalliques est jointe à ce mémoire (Chapitre III de la troisième partie).

DEUXIEME PARTIE : ETUDE GITOLOGIQUE DU VAL D'AOSTE

Afin d'entreprendre l'étude gîtologique du Val d'Aoste, il nous a fallu accumuler une somme de connaissances sur les différents types de gisements (géométrie, importance, contexte géologique). Il a été nécessaire de nous livrer sur le terrain à un travail d'analyse des principaux gisements jadis exploités. Nous avons sélectionné 29 gisements parmi un grand nombre répertorié par les services miniers italien et français (Office des mines de Turin et B.R.G.M.). En fait, nous avons choisi les gisements les plus importants du Val d'Aoste, Cogne, Hérin, Ollomont, Petit Monde, Promise et Brusson. Des études géochimiques et géophysiques ont été entreprises pour déterminer d'éventuels prolongements des anciens gisements ou rechercher de nouveaux centres d'intérêt miniers. Les méthodes de prospection exposées dans la première partie ont été adaptées à l'étude de plusieurs sites miniers (Fig. 18) :

- étude des caractères géochimiques du gisement de fer de Cogne (vallée du grand Eyvia) et comparaison avec les gisements de fer de la région du Mont Avic (complément des études antérieures de J. Pocachard, 1978 et de J.-L. Garciaz, 1979) ;
- prospections géophysiques (géométrie du gisement) et géochimiques (extension de la minéralisation) du gisement d'Hérin (vallée de Champdepraz) ;
- étude géochimique du gisement de Petit-Monde (Valtournanche) qui avec celle des sites précédents, semble apporter des informations importantes sur la présence des métaux rares (platinoïdes) ;
- prospections géophysiques à caractère régional du gisement de Promise (Val Ruitor) dont la présence non négligeable d'argent doit renouveler l'intérêt.

Les autres gisements (anciennes exploitations artisanales pour la plupart) ont fait l'objet d'observations géologiques sommaires qui complètent nos connaissances sur les mines du Val d'Aoste.

CHAPITRE I

INVENTAIRE DES GISEMENTS ET INDICES RECONNUS

1.1. LES GISEMENTS DE MAGNETITES ASSOCIEES AUX SERPENTINITES ; INVENTAIRE, DESCRIPTION ET SITUATION GEOLOGIQUE SOMMAIRE

1.1.1. Les gisements de la zone du Combin

1.1.1.1. Cogne

Situation géographique

X = 373,000 Y = 5052,100 Z = 2 072 m. Carte Cogné (Fig. 19).

Carte géologique

La magnétite de Cogné est liée à des serpentinites qui forment une lentille de 1 000 m d'extension sur 100 m de puissance en moyenne.

Ces serpentinites reposent tectoniquement sur une puissante formation de calcaires métamorphiques triasiques ; le toit est constitué de calcschistes bruns.

Minerai

L'amas de magnétite mesurait 600 m de long, 50 à 70 m de puissance, l'exploitation (25 Mt extraites) s'est effectuée de 2 072 m à 2 400 m d'altitude.

La magnétite est massive, noir mat, sans linéation visible, à texture très fine.

Minéralogie

Magnétite (51 à 70 % Fer)

Pyrite : très rare, isolée, associée à des fractures.

Mélanterite ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) : provient de l'oxydation et de la décomposition de la pyrite.

Amiante dans les serpentinites.

Sphène dans les calcschistes.

Dolomite épigénétique et cristallisée en rhomboèdres dans les serpentinites.

Remarque : ce gisement a été étudié plus en détail (chapitre II, 2ème partie).

1.1.2. LarcinazSituation géographique

X = 373,600 Y = 5053,300 Z = 2 033 m - Carte Cogne (Fig. 19).

Situé à l'Est de la Pointe de Creya et au Nord de la mine de Cogne, en rive gauche du torrent Grauson, cet amas est beaucoup moins important que celui de Cogne (30 000 t extraites).

Roches encaissantes

Idem à Cogne.

Minéralisation

Magnétite, sidérite (rare) près des calcaires, amiante.

Morphologie du gîte

Amas.

1.1.3. Plan FrançoisSituation géographique

L'indice se situe au NW de l'alpage Plan François.

X = 370,500 Y = 5054,500 Z = 1 750 m. Carte Cogne (Fig. 20).

On y accède par un chemin forestier au Nord de Cretaz qui passe par l'alpage Plan François.

Cadre géologique : la minéralisation est associée à une lentille de serpentinites intercallée dans les paraschistes de la zone du Combin (Fig. 21).

Minéralisation

Le minerai est constitué de pyrrhotite cobaltifère et nickélique et de magnétite. En section polie, les différents minéraux reconnus sont les suivants : pyrrhotite, pyrite, magnétite, chalcopryrite, pentlandite, bravoïte, marcassite (aspect bréchique).

La pyrrhotite forme l'essentiel du minerai et contient en exsolution des cristaux automorphes de pentlandite (photo 1). La pyrrhotite est localement altérée en marcassite. La magnétite recoupe la pyrrhotite et s'est formée par oxydation de ce dernier minéral. La bravoïte, d'origine hypogène, se développe autour de la pentlandite.

L'ordre de cristallisation des différentes phases est le suivant : pyrrhotite et pentlandite, magnétite, pyrite et chalcopryrite (rare).

Cette association suggère, d'après P. Picot (communication orale), un gisement d'origine orthomagmatique repris par le métamorphisme.

1.1.1.4. Carto Muta

Situation géographique : L'indice est situé au NE du gisement de Cogne

X = 375,700 Y = 5052,900 Z = 2 800 m - Carte Cogne (Fig. 19).

Carte géologique : roches vertes de la zone du Combin.

Roches encaissantes : serpentinites et amphibolites.

Minerai : magnétite microcristalline, en lits centimétriques très plissés et magnétite en octaèdres.

Ce très petit indice est situé dans une zone très tectonisée, ce qui explique les cristallisations importantes (magnétite, amphibole, calcite).

1.1.1.5. Montzecco

Situation géographique

X = 371,900 Y = 5050,600 Z = 2 050 m. Carte Cogne (Fig. 19).

L'accès à cet indice est facilité par la proximité du télécabane du Belvédère. Depuis ce dernier, il faut descendre environ 30 m par un chemin très escarpé dans la falaise.

Minéralisation

La minéralisation, composée d'un mélange de pyrite et de magnétite, est localisée le long d'un contact de nature tectonique entre des serpentinites très schisteuses et des prasinites (Fig. 22). Une galerie de recherche d'environ 10 m permet de suivre la minéralisation dont la puissance est au maximum de 1 m. La pyrite et la magnétite forment des lits millimétriques alternés et présentent une texture grenue.

1.1.2. Gisements de magnétite de la zone de Zermatt-Saas-Fee

Introduction : caractères généraux

Ces gisements sont tous associés à l'écaïlle de serpentinites du Mont-Avic. Ce sont tous des gisements de faible importance.

1.1.2.1. Val Ponton

Situation géographique

Indice inférieur : X = 386,800 Y = 5060,600 Z = 2 160 m

Indice supérieur : X = 386,600 Y = 5060,200 Z = 2 400 m

Carte Nus (Fig. 23).

Historique

La première concession a été accordée en 1848 ; l'exploitation jusqu'en 1860 a permis d'extraire 8 000 tonnes de minerai.

Caractères géologiques

Les deux indices sont d'une importance égale : l'extension de chaque minéralisation est d'environ 40 m pour une puissance moyenne de 3 m. Ces deux indices semblent appartenir à un même horizon minéralisé.

1.1.2.2. Lac Gelé

Situation géographique

X = 387,200 Y = 5058,100 Z = 2 616 m - Carte Pointe Tersiva (Fig. 24).

L'accès à ce gisement, situé à 1 km au sud du Mont Avic, se fait par la vallée de Champdepraz (en voiture jusqu'au village de La Volla).

Minéralisation

La minéralisation apparaît sous la forme de bancs de magnétite allongés dans la schistosité des roches encaissantes (serpentinites).

L'exploitation se faisait dans deux gros bancs parallèles, orientés N50° 50' W, d'une épaisseur décimétrique (Fig. 25). Cette direction est identique à celle des plans de fracture, l'extension réelle du gisement se faisant selon l'axe d'un pli N100° 10' W (J. Pocachard, 1980, Fig. 26).

Minéralogie

En section polie, le minerai se présente sous la forme de grains de magnétite dans lesquels nous pouvons observer :

- des résidus de pentlandite transformés en bravoïte ;
- des fantômes de chromite (photo 2) ;
- des pyrrhotites altérées.

1.1.2.3. Usseï

Situation géographique

X = 393,400 Y = 5066,500 Z = 610 m.

Carte Châtillon (Fig. 27).

Cet indice est situé sous le château d'Usseï. Les travaux peu importants, consistent en deux galeries de faible extension.

Minéralisation

La magnétite, le seul minerai visible macroscopiquement, se dispose en lits allongés dans les plans de schistosité des serpentinites. La puissance des lentilles de magnétite était de 3 à 4 m.

1.1.2.4. Raye chevrère

Situation géographique

X = 386,500 Y = 5058,600 Z = 2 700 m

Carte Nus (Fig. 28)

L'indice est localisé à 1 km au NW du gisement du Lac Gelé.

Minéralisation

Cet indice possède les mêmes caractéristiques : la magnétite est disposée en lits millimétriques à décimétriques parallèlement à la schistosité.

Le "filon" de magnétite est affecté de nombreux plis et son extension est décamétrique (Fig. 29).

1.1.2.5. Valmeriana

X = 389,900 Y = 5061,600 Z = 2 150 m

Carte Châtillon (Fig. 30).

Cet indice situé dans le haut Vallon de Mollinaz, présente des caractères semblables à tous les gisements de magnétite de cette région. L'extension de la zone enrichie est d'environ 100 m pour une puissance de 10 m (Fig. 31).

1.2. INDICES CUPRIFERES1.2.1. Gisement de Chuc-ServetteSituation géographique

Servette X = 379,800 Y = 5062,200 Z = 1 800 m

Chuc X = 379,200 Y = 5061,900 Z = 1 450 m

L'ancienne mine est située en rive droite du Vallon de Saint-Marcel (Mine de Servette) et se prolonge en rive gauche (Mine de Chuc). Carte Nus (Fig. 32).

Historique

Les travaux miniers souterrains sont beaucoup plus importants à Chuc qu'à Servette.

A Chuc, l'exploitation se faisait en 6 niveaux échelonnés de 1 322 m à 1 443 m d'altitude (Office Minier de Turin).

Il est malheureusement impossible de visiter ces galeries car les entrées sont murées.

A Servette, les travaux de surface sont importants car la minéralisation se trouve parallèle à la pente topographique ; quelques galeries de faible longueur sont visitables actuellement (Fig. 33 et 34).

Production

La production moyenne mensuelle était de 380 t en 1955. Elle a atteint 1 550 t en 1942 (Office Minier de Turin). La teneur moyenne en cuivre était de 3 %.

Roches encaissantes

La minéralisation est localisée dans une formation de métavolcanites composée de chloritoschistes à grossulaire et sulfures (photo 3), de grenatites et de glaucophanites à grenat.

Minéralisation

Elle est essentiellement constituée de pyrite cuivreuse (2 à 3 % Cu). Des zones localement plus riches en cuivre (10 à 15 % Cu) existaient dans certaines galeries (Office Minier de Turin). Le minerai forme des lits millimétriques à métriques allongés dans la foliation de l'encaissant.

Morphologie du gîte

La structure minéralisée a un aspect lenticulaire mais nos connaissances sont trop limitées pour prévoir la présence de niveaux plus importants.

La gangue est parfois quartzitique ; dans ce cas la pyrite est disséminée sous la forme de grains millimétriques. L'encaissant contient en général un peu de pyrite disséminée.

Minéralogie

La paragenèse métallique est constituée de pyrite, chalcopryrite, cuivre natif, pyrrhotite, blende, ilménite, hématite, rutile, magnétite, bornite, marcassite (Office Minier de Turin).

En section polie, nous reconnaissons : pyrite, magnétite, chalcopryrite, bornite, grenat.

La chalcopryrite et la magnétite (automorphe) sont incluses dans la pyrite (photo 4).

La bornite est associée à la chalcopryrite.

1.2.2. Gisements de Lovignana et Tramail de la RousseSituation géographique

Lovignana : X = 382,700 Y = 5051,600 Z = 1 450 m

Tramail de la Rousse : X = 381,300 Y = 5058,500 Z = 2 500 m

Carte Nus (Fig. 35).

Situés en rive gauche du val Fenis, respectivement en amont de Marqueron et sous la falaise de Plan Rué, ils présentent les mêmes caractères géologiques que le gisement de Servette.

Historique

L'ancienne mine de cuivre de Lovignana a fait l'objet de travaux importants connus depuis le XIIIe siècle.

Roches encaissantes

L'encaissant est constitué de chloritoschistes à grenat et d'amphibolites ; la gangue est parfois quartzitique.

Minéralisation

Le minerai est représenté par de la pyrite cuivreuse formant des rubanements allongés dans la schistosité. La paragenèse métallique comprend la pyrite, la chalcopryrite et la magnétite.

En sections polies les minéraux identifiés sont : ilménite, grenat, rutilé, pyrite, chalcopryrite, pyrrhotite.

Le minerai se compose de pyrite et de chalcopryrite. La pyrrhotite (rare) est incluse dans la pyrite.

L'ilménite, très fréquente, automorphe, lamellaire est localisée dans les grenats, en association avec le rutilé. De la pyrite et de la chalcopryrite sont incluses dans les grenats (photo 5).

La mine de Tramail de la Rousse est de faible importance (peu de déblais, galeries de longueur décamétrique). Le minerai présente, en section polie une paragenèse proche de celle de Lovignana : grenat, rutilé, ilménite, pyrrhotite (rare), pyrite, chalcopryrite, magnétite, hémétite.

1.2.3. Mine d'Hérin (Champdepraz)

Situation géographique

X = 393,700 Y = 5061,200 Z = 1 600 m

L'étude détaillée de ce site est présentée dans le paragraphe 2.4. Cette ancienne mine de cuivre se situe près du village d'Hérin, au-dessus de Champdepraz. Carte Châtillon (Fig.36). L'accès en est actuellement possible par le chemin qui monte aux alpages de Crestaz et d'Hérin.

Cadre géologique

Ce gisement est lié à la couverture volcano-sédimentaire des serpentinites du Mont Avic. Il se situe au contact de micaschistes plus ou moins quartzeux et d'un ensemble d'amphibolites à glaucophane et grenat et de chloritoschistes grenatifères.

Minéralisation

La couche minéralisée se présente sous forme d'un ensemble de lentilles d'une puissance variant de 0,2 à plusieurs mètres. Les zones plus épaisses correspondent aux concentrations créées par des plissements d'axe E-W. La structure minéralisée est orientée N 100° avec un plongement Sud de 20 à 50°.

Il existe deux types de minéralisations :

- essentiellement aurifère (chalcopryrite) dans la zone Est.
- pyriteuse dans la zone Ouest.

La chalcopryrite massive, limitée à la zone Est, se présente sous forme d'un "filon" couche orienté N 90 à pendage fort vers le Sud, interstratifié dans les chloritoschistes à grenat. L'épaisseur réduite du "filon" était de 20 cm. De la chalcopryrite apparaît aussi en imprégnations dans les chloritoschistes. La pyrite se présente en globules subautomorphes dont la taille varie de 1 mm à 1 cm. Le passage de la zone pyriteuse à la zone chalcopryriteuse n'est pas franc.

Les globules de pyrite sont cimentés par la chalcopryrite ; et dans la zone la plus riche en cuivre, la pyrite disparaît complètement.

1.2.4. Mine d'Ollomont

Situation géographique

X = 368,265 Y = 5979,775 Z = 1 420 m

Carte Ollomont (Fig.37). En amont d'Ollomont, le chemin de terre avant le pont de Vorrèce, nous mène à une excavation au pied d'une falaise qui est l'entrée du puits de Balmes (rive gauche du torrent d'Ollomont). Le puits est recouvert d'une dalle de béton).

Entre Rey et Voex, en rive droite du torrent, les entrées de la mine sont foudroyées ou bétonnées. A Frissonia di Sopra, une galerie actuellement entrepôt de fromage, rejoint l'exploitation Saint-Jean.

Historique

Ce gisement a été étudié par P. Piepoli (1933) en pétrographie, par G. Elter (1945) en minier et par P. Gex et F. Morel (1977) en géophysique.

Ce fut l'une des plus importantes mines de cuivre du Val d'Aoste. Les premiers travaux remontent au XVIII^e siècle. Les périodes d'activité intense ont été de 1905 à 1911 et de 1937 à 1944.

Les travaux étaient répartis en trois secteurs (Fig. 37 et 38), entre le village de Rey et Vaud : Saint-Jean à Rey (rive droite), Balme (Voex) et Vaud (rive gauche). L'exploitation s'est faite sur une dénivellation maximale de 400 m à Saint-Jean et sur une longueur de 500 m en direction à Balme.

La production du 1^{er} Janvier au 29 Juillet 1944 est de :

- pyrite concentrée, 1 000 tonnes à 0,71 % de Cu et 48 % de S ,
- chalcopryrite concentrée, 3 000 tonnes à 20 % de Cu et 32 % de S.

La teneur moyenne de la pyrite cuprifère en Cu est de 1 à 3 %.

Cadre géologique

Schistes lustrés à ophiolites (calcschistes, serpentinites et prasinites) de la zone Zermatt-Saas-Fee, proche du contact avec les gneiss du Grand-Saint-Bernard.

Roches encaissantes

Schistes verts de type ovardite (plagioclase albitique, chlorite, épidote, séricite) et calcschistes.

Minéralisation

. Minerai - pyrite en cubes à arêtes vives, visibles à l'oeil nu. La structure au microscope est automorphe et cataclastique :

- chalcopryrite, microscopique, en fins agrégats, à traces fréquentes de déformations plastiques (Piepoli, 1933),
- bornite, blende, pyrrhotite en très petite quantité.

. Gangue : essentiellement constituée de quartz en agrégats ou en fibres. Le quartz a une structure cataclastique et une extinction ondulante. Les cristaux de quartz sont orientés dans le sens des strates. Les composants mineurs de la gangue sont la calcite, la chlorite, la séricite et le plagioclase (Piepoli, 1933).

En sections polies la bornite et la chalcopryrite sont incluses dans la pyrite (Photo 6). La chalcopryrite est aussi indépendante. Nous avons remarqué la présence de pyrrhotite, du rutile et du sphène.

Morphologie du gîte

Le gîte d'Ollomont est stratiforme (Fig. 39). Le minerai massif forme des faisceaux de petites strates subparallèles, séparées par des couches de pyrite et chalcopryrite diffuses. La puissance globale des couches minéralisées varie de 10 cm à 4 m, et sa puissance maximale est de quelques dizaines de mètres. L'extension globale est de l'ordre du kilomètre.

Les similitudes géologiques et minéralogiques des gisements d'Ollomont et d'Alagna (Valsesia) sont nombreuses (P. Gex et F. Morel, 1977) :

. ces deux gisements appartiennent au complexe géologique des schistes lustrés (Alagna se trouve près du contact tectonique avec la zone supérieure des gneiss de Sesia-Lanzo) ;

. la minéralisation, toujours située dans les roches vertes, est constituée pour l'essentiel de pyrite, de chalcopryrite et de pyrrhotite, en proportion variable, dans une gangue de quartz, chlorite, calcite et albite ;

. ces deux gisements sont stratiformes.

L'activité de la mine d'Alagna (Miniera Torrente Otro) se poursuit actuellement surtout en profondeur, aux environs de -200 m, avec l'exploitation de plusieurs niveaux de sulfures massifs. Les techniques nouvelles de prospection (magnétométrie et résistivité) ont mis en évidence de nouvelles réserves (1,5 millions de tonnes de minerai à des teneurs de l'ordre de 1,5 % de cuivre).

Compte tenu de ces résultats positifs, il serait souhaitable d'engager des travaux de prospection sur le gisement d'Ollomont afin d'effectuer une estimation de ses réserves (prospection au sol magnétique et électrique). A une autre échelle, la prospection aéromagnétique (intervention de l'hélicoptère) sur la région Nord du Val d'Aoste entre Ollomont et Gressoney la Trinité, semble bien adaptée à la recherche de nouveaux gisements du type d'Ollomont et d'Alagna.

1.2.5. Mine de Bionaz

Situation géographique

X = 376,500 Y = 5080,600 Z = 1 483 m

Carte Oyace (Fig.40). L'ancienne mine se situe dans le fond de la vallée en rive gauche, sous la commune de Dzovenno. Le foudroyage des entrées interdit la visite de la mine.

Historique

La mine a cessé toute activité en 1905.

Aucune documentation n'a été découverte à propos de l'activité de cette mine.

Cadre géologique

Le gisement est situé à proximité du contact entre les diorites mélanocrates et les gneiss paléozoïques.

Roches encaissantes

Gneiss et micaschistes à biotite et sillimanite.

Minéralisation

Minerai : chalcopryrite - pyrite

Gangue : quartz

Les haldes sont recouvertes par la végétation.

Morphologie du gîte

Gîte filonien d'après la littérature (carte 1/320 000 BRGM)

1.2.6. Mine des VorpillesSituation géographique

X = 392,350 Y = 5085,550 Z = 2 000 m

Carte Valturnanche (Fig.41).

Cadre géologique

Schistes lustrés à ophiolites de la zone Zermatt-Saas-Fee

Roches encaissantes

Séquence de prasinites épidotiques, ovardites dans la partie Nord du gisement. Au Sud du gisement quelques écailles de serpentinites laminées.

Minéralisations

Minerai : pyrite - chalcopryrite, bornite, blende.

Gangue : quartz

Morphologie du gîte

Gîte stratiforme.

1.2.7. Mine de Petit-MondeSituation géographique

X = 390,000 Y = 5075,200 Z = 1 350 m

Carte Saint-Vincent (Fig.42).

Le gisement pyrito-cuprifère de Petit-Monde se situe dans la partie du territoire de Trognon qui s'étend sur la rive droite de la moyenne vallée de Valturnanche, près de Antey-Saint-André à Fiernaz (Pontac).

Pour accéder à la mine, il faut prendre un sentier en aval de Fiernaz, à l'Ouest du hameau de Pontaz (Hôtel Restaurant).

Historique

Burtet Fabris, Dalpiaz, Omenetto (1971) et Piepoli (1934) ont étudié ce gisement en pétrographie.

Le début de l'exploitation remonte à la moitié du XIX^e siècle. Elle a été abandonnée une première fois en 1927. D'après le Ministère de l'Economie Nationale, il y avait 2 % de Cu, 50 à 80 g d'Ag et 4 à 23 g d'Au par tonne de minerai. Une nouvelle période d'exploitation a eu lieu de 1941 à 1946 (Fig.43). Entre 1942 et 1945 il a été extrait 46000 tonnes de tout venant à 0,95 % de Cu.

Cadre géologique

Schistes lustrés à ophiolites de la zone Zermatt-Saas-Fee

Roches encaissantes

Eclogites métamorphisées (grenat-glaucophane-chlorite-épidote). Métagabbros (feldspath albitique \pm épidotique, chlorite, amphibole, pyroxène en reliques). Pyroxénites \pm métamorphisées avec amphacite. Prasinites, amphibolites (chlorite, amphibole \pm chloritisée, albite, épidote). Les prasinites présentent souvent une texture lenticulaire et zonée, parfois ocellaire ou linéaire. Serpentinites.

Minéralisations

Minerai : chalcopryrite, covelline, azurite, malachite et pyrite. La minéralisation se présente en lits centimétriques à décimétriques synschisteux ; la puissance moyenne des niveaux pyriteux est de l'ordre de 1 m.

Gangue : nous avons remarqué que la gangue est de nature voisine de celle de la roche encaissante avec en moins clinozoïsite et pistachite et en plus sérécite.

L'étude en sections polies a montré la présence dans le minerai de la pyrite et chalcopryrite. La chalcopryrite et la bornite, sont en inclusions dans la pyrite (Photo 7). La magnétite est absente dans les sections polies étudiées. Le sphène est en petites inclusions.

Morphologie du gîte

Le gisement de Petit-Monde est stratiforme. La structure minéralisée est pentée de 20 ° vers le NW avec une direction NE-SW. Dans le détail, cette structure (lenticulaire stratiforme) est plus complexe. Par place des renflements de la minéralisation se produisent en liaison aux accidents tectoniques tels que plis et failles (concentration de la minéralisation dans les têtes de plis). L'extension du gisement est hectométrique (160 m x 100 m) et sa puissance moyenne est de 1 m. La puissance maximale est de l'ordre de 5 m (il n'y a pas de séparation nette entre la minéralisation et son encaissant).

Connaissant les caractéristiques des gisements étudiés dans le Val d'Aoste, nous pensons que des prolongements de la minéralisation de Petit-Monde sont probables (structures lenticulaires hectométriques en chapelet ; mines de Cogne, Promise et Hérin).

En outre, nous avons montré que l'association sulfures-métaux rares (platinoides) est très forte dans le minerai de Petit-Monde (paragraphe 1.3.2., chapitre I, troisième partie).

Il serait souhaitable d'orienter les prospections pour découvrir d'autres amas minéralisés et d'examiner le minerai susceptible de contenir des métaux du groupe du platine.

1.2.8. Mine d'Ayas

Situation géographique

X = 396,600 Y = 5075,600 Z = 2 310 m

Carte Saint-Vincent (Fig.44)

Dans le haut du vallon d'Ayas, la minéralisation du Mont Ros (dénomination locale) est située à 2 km environ au NW d'Antagnod, dans le prolongement du télésiège. Il n'y a pas de véritable sentier pour accéder à la mine. Les haldes se repèrent nettement au-dessus de la zone boisée traversée par des pistes de ski.

Historique

Le gisement a été exploité au XVIII^e siècle (pas de documentation sur cette mine).

Cadre géologique

Schistes lustrés à ophiolites de la zone du Combin.

Roches encaissantes (Fig.45a)

Séquence volcano-sédimentaire de calcschistes et de prasinites de types variés (prasinites au sens strict, prasinites épidotiques, prasinites finement citées avec micas blanc et calcite).

Minéralisations

Minerai : pyrite, chalcopryrite (inclusions), blende (traces)

Gangue : quartzites, prasinites et schistes quartzitiques.

Morphologie du gîte

Gîte stratiforme (Fig.45b). L'épaisseur est de l'ordre du mètre.

1.2.9. Mine d'Effraz

Situation géographique

X = 378,900 Y = 5070,200 Z = 1 435 m

Cartes Torgnon et Monte Faroma (Fig.46).

Le gisement de cuivre pyrite d'Effraz se situe dans le Val Saint-Barthélémy entre Ville sur Nus et Lignan, sur le versant droit de la vallée. Pour accéder à la mine, il faut suivre la courbe de niveau 1 435 m (pas de sentier) en amont du pont qui traverse le torrent d'Auville.

Historique

La dernière activité de la mine date de 1910. Les travaux sont très modestes et se résument à deux galeries parallèles d'extension limitée (20 m). Aucune documentation n'a été retrouvée sur cette mine.

Cadre géologique

Le gisement se situe dans les schistes lustrés à ophiolites (calcschistes, prasinites et serpentinites) à proximité de la nappe de la Dent Blanche.

Roches encaissantes

Calcschistes riches en lentilles de quartz, synschisteuses. Prasinites et amphibolites.

Minéralisations

Minerai : pyrite massive en banc (70 cm d'épaisseur) magnétite subautomorphe.

Gangue : quartzites.

En sections polies, nous avons reconnu la magnétite et la pyrite. La bornite est incluse dans la pyrite. Le minerai contient quelques traces de blende et de chalcopryrite. Minéral d'altération : hématite.

Morphologie du gîte

Gîte stratiforme d'épaisseur réduite de l'ordre du décimètre.

1.2.10. Mine de Salsa-Schelbete

Situation géographique

X = 308,250 Y = 5075,800 Z = 1 850 m

Carte Gressoney (Fig.47).

Historique

Les travaux les plus importants sont constitués de galeries de longueur décamétriques creusées sur plusieurs niveaux dans les serpentinites à magnétite. Nous accédons au niveau inférieur par une descenderie longue de 20 à 30 m. Autour de l'entrée principale de la mine, il existe une galerie de recherche de 60 m de longueur et un grattage effectué dans de la pyrrhotite et pyrite massive.

Cadre géologique

Schistes lustrés à ophiolites de la zone du Combin

Roches encaissantes

Serpentinites à magnétite.

Minéralisations

Minerai : pyrite, pyrrhotite, chalcopryrite et magnétite

Gangue : serpentinites

Morphologie du gîte

Le gîte est de type stratiforme.

1.3. GISEMENTS DE MANGANESE

Cadre géologique

Les indices de manganèse de la région sont associés à des métasédiments de la zone des schistes lustrés piémontais. Ces métasédiments sont représentés par des quartzites (anciennes radiolarites) formant un niveau repère que l'on retrouve souvent dans la région. La minéralisation est constituée par de la braunite associée à divers silicates manganésifères.

Les quartzites sont en général en contact avec des roches vertes (prasinites et prasinites amphiboliques).

1.3.1. Mine de Prabornaz

Situation géographique

X = 379,300 Y = 5060,000 Z = 1 800 m

Carte Mont Emilius (Fig.48).

Située en rive gauche du torrent de St-Marcel, en amont de la mine de cuivre de Servette, cette ancienne mine présente un intérêt exceptionnel du fait de la puissance de la minéralisation, de sa richesse en minéraux rares et de la présence d'or natif.

Cadre géologique

Le manganèse apparaît sous la forme d'une couche de braunite massive contenue dans des quartzites à minéraux manganésifères (Fig. 49). Ces quartzites sont en contact au mur avec des prasinites très schisteuses à petites globules millimétriques de pyrite, et au toit avec des prasinites plus claires à gros feldspaths blancs.

L'encaissant, comme le niveau minéralisé, est recoupé de nombreux filonnets de quartz replissés ; les quartzites présentent de nombreux microplis visibles surtout dans les zones riches en minéraux manganésifères colorés (piémontite-alurgite).

Géométrie du gisement

Les quartzites forment une lentille d'environ 80 m sur 30 m orientée N 30° avec un pendage de 25° vers le Nord-Ouest. L'orientation de cette lentille est parallèle à celle des roches vertes encaissantes (gîte stratiforme). L'épaisseur moyenne est de 1 m avec des renflements de 2 à 3 m. L'épaisseur maximale des amas est de 10 m. La lentille s'amincit dans toutes les directions (au Sud, dans le fond des galeries, on peut observer encore la minéralisation).

Minéralogie

- La braunite ($3 \text{Mn}_2\text{O}_3 \cdot \text{MnSiO}_3$) forme l'essentiel du minerai de manganèse. De couleur noire, microcristalline, elle coexiste avec l'hollandite ($\text{BaMn}_8\text{O}_{16}$), qu'il est impossible de distinguer sans analyses chimiques, et le quartz (P. Brown et al. 1978). La braunite apparaît dans les minerais exhalatifs sédimentaires comme produit du métamorphisme de roches sédimentaires manganésifères.

- Les pyroxènes

- . la violane : s'apparente à l'omphacite, couleur violet vif. Elle contient plus de 2,5 % de MnO_2 ;
- . la diopside : associé à la violane;
- . l'aegyrine : en lentilles dans les quartzites. Contient des paillettes d'or natif.

- Les micas

- . phlogopite manganésifère.
- . phengite manganésifère (alurgite) : couleur rouge.

- Autres minéraux :

- . piémontite (épidote rouge)
- . sphène
- . trémolite fibreuse
- . albite microcline
- . calcite aragonite
- . apatite
- . grenat spessartite
- . magnétite
- . or natif

Métamorphisme

Le métamorphisme qui a affecté la couche minéralisée est du type schistes bleus et correspond à une température de 300°C sous une pression de 8 k bars (Bocquet 1974).

Morphologie du gîte

Amas stratiforme d'épaisseur décimétrique.

Les exploitants ont cessé toute activité lorsque l'épaisseur de la couche minéralisée devenait inférieure au décimètre. Sans étude géologique nous pourrions penser que l'extension du gisement se limite à la lentille déjà exploitée. Or la plupart des gisements étudiés dans le Val d'Aoste (Cogne, Promise, Petit-Monde) possèdent une caractéristique commune : une structure lenticulaire en chapelet. Prabornaz est du même type, ce qui nous fait penser que l'amas affleurant exploité ne doit pas être le seul et qu'il existe probablement une récurrence de cette structure. Le problème actuel est de pouvoir localiser ces amas économiquement intéressants (association or natif et oxydes de manganèse) dans le contexte géologique de Prabornaz (enfouissement rapide de la minéralisation).

1.3.2. Mine d'Issologne

Situation géographique

X = 383,750 Y = 5072,250 Z = 1 500 m
Val Saint-Barthélémy, carte Torgnon (Fig.50).

Cadre géologique

Schistes lustrés à ophiolites.

Roches encaissantes

Calcschistes

Minéralisation

Minéral : braunite, malachite

Gangue : quartz

Morphologie du gîte

Amas stratiforme d'épaisseur décimétrique.

1.3.3. Indice de Robbio

X = 382,600 Y = 5060,900 Z = 1 600 m Carte Nus (Fig.35).

Il n'existe pas de galeries d'exploitation mais la minéralisation affleure au pied de la falaise. Le contexte géologique est le même qu'à Prabornaz (vallon de Saint-Marcel) : la falaise est constituée de prasinites claires à feldspaths blancs subglobuleux. Le minerai est associé à des quartzites et se présente en lits alternés de braunite, de quartzites à alurgite et piémontite et de quartzites à rhodocrosite.

La direction générale des prasinites et de la minéralisation (gîte stratiforme) est N 30° avec un pendage faible vers l'Ouest.

La minéralisation est visible sur environ 10 m de longueur mais se trouve ensuite cachée par un éboulis. Sa puissance est très variable (en moyenne 30 cm) du fait du rubannement et du microplissement.

1.3.4. Indice du Val Grauson

X = 376,600 Y = 5055,100 Z = 2 350 m Carte Cogne (Fig.51).

Ce petit indice, qui n'a pas été exploité, se présente en une lentille de quelques mètres de longueur sur 0,5 m de puissance. Le minerai est formé de braunite et de rhodocrosite. La lentille allongée dans le plan de la schistosité est liée à des quartzites noirs encaissés dans des prasinites vertes pâles.

1.4. GISEMENTS DE PLOMB, ZINC ET CUIVRE

1.4.1. Indice de Valeille

X = 374,100 Y = 5046,000 Z = 2 000 m. Carte Grand-Saint-Pierre (Fig.52).

Cadre géologique

Le gîte se situe dans les gneiss minuti du Grand Paradis, près du contact avec les granites.

Géométrie du gisement et minéralisation

Il existe deux galeries : l'une très peu minéralisée (galerie de recherche probablement) se trouve au niveau d'une faille dans les gneiss minuti ; la seconde minéralisée en galène (PbS), blende (ZnS), chalcopryrite (CuFe S₂) et mispickel (As Fe S₂), se situe dans un niveau de micaschistes.

Il s'agit d'un filon-couche de quartz blanc, minéralisé surtout aux épontes, sous la forme d'un rubannement de minerai finement grenu. L'extension de cette galerie est d'environ 10 m. On peut observer un deuxième type de minéralisation le long de petites fractures perpendiculaires à la schistosité. Le minerai se présente dans ce cas en petits cristaux automorphes.

1.4.2. Mine de Promise

Se reporter chapitre III de la deuxième partie.

1.5. GISEMENT FLUORO-BARYTIQUE

Trou des Romains (Barytine, Fluorine)

Introduction - Travaux

L'ancienne mine du Trou des Romains, également appelée mine du Labyrinthe ou Borne de la Fée, se situe au NE de Courmayeur sur le versant SE du Mont de la Saxe en rive droite du Val Sapin. L'entrée principale (lieu dit Trou des Romains) est à l'altitude 1 714 m au-dessus de l'alpage Chapy (Fig.53).

L'exploitation de ce gisement remonte probablement à des temps anciens, ce qui expliquerait le nom de la mine, Trou des Romains. La structure minéralisée fluoro-barytique a été exploitée au XII^e siècle. Quelques travaux importants ont suivi après, en 1774 exécutés par Nicolis de Robilant, Inspecteur général des mines du Royaume de Sardaigne. En 1976, quelques travaux de recherche uniquement, ont été exécutés (galerie de recherche 1 560 m).

P. Castello (1977) a publié une étude minéralogique précise sur la minéralisation du Trou des Romains.

J. Pocachard (1980) a prélevé des roches (par carottage) dans la couche minéralisée, dans les calcaires spathiques adjacents et dans d'autres sites plissés (cipolins de la zone Briançonnaise). L'analyse de l'aimantation rémanente de certains échantillons ont mis en évidence la relation qui existe entre la structure des roches et ses effets magnétiques.

Cadre géologique

La minéralisation s'intercale stratigraphiquement dans les calcaires spathiques sombres qui appartiennent à la couverture sédimentaire autochtone liasique du soubassement cristallin du Mont Chétif - Mont de la Saxe, l'ensemble faisant partie de la zone helvétique au sens large.

Méthode d'exploitation

L'extraction du minerai a été réalisée suivant deux types : à ciel ouvert par abattage d'un panneau minéralisé sur le versant SE du Mont de la Saxe en amont de l'alpage Chapy et en excavation souterraine au-dessus de cet alpage (lieu dit Trou des Romains). L'excavation de la mine a été facilitée par la présence de cavités karstiques, qui suivent fidèlement la structure minéralisée (Fig. 54 et 55).

Géométrie du gisement

La structure minéralisée fluoro-barytique a été observée en divers endroits de la région de Courmayeur (Fig.53) :

- au Sud du Mont Chétif sur le plan Chécrouit ;
- sur le versant SE du Mont de la Saxe au Trou des Romains et à l'alpage Chapy.
- au SE de la Tête Bernard.

L'extension horizontale de ces quatre indices est d'environ 7 km. Les caractères géologiques et métallogéniques de ces quatre points sont identiques.

Les quatre indices se disposent sur un plan orienté N 50° fortement penté vers le SE parallèle à la schistosité régionale.

La minéralisation fluoro-barytique a été suivie en galerie souterraine (trou karstique) jusqu'à une centaine de mètres en pendage aval à partir de l'entrée Trou des Romains 1714 m (Fig.54).

La puissance de la minéralisation varie fortement entre la simple trace et les amas de 2 à 3 m d'épaisseur. Les amas du Trou des Romains et de l'alpage Chapy ont été exploités. Leur extension est limitée à des lentilles décimétriques. Leur structure d'W en E se schématise selon des coupes NS des lentilles (Fig.56).

Entre les amas, lorsque l'observation de la minéralisation est possible (roche affleurante sans recouvrement, cavité karstique, galerie de recherche) la minéralisation est représentée par une fine couche centimétrique de barytine. Malgré des observations discontinues de la minéralisation, nous pensons que la structure le long de laquelle apparaît la minéralisation est continue entre le Plan Chécrouit et la Tête Bernard. Toutefois, nous pensons que les concentrations minérales s'y développent en chapelets sans que nous puissions en préciser l'importance.

L'origine des amas a probablement deux causes : épaissement lié aux conditions paléogéographiques et épaissement par récurrence de la minéralisation.

- Épaissement lié aux conditions paléogéographiques. Les bancs de calcaire formant l'encaissant de la minéralisation, connaissent des fluctuations rapides d'épaisseur de l'ordre du mètre et entraînant des biseaux stratigraphiques. Ce phénomène sédimentaire contrôle la structure minéralisée.

- Épaississement par récurrence de la minéralisation. Le plissement de la série liasique provoque le redoublement des roches encaissantes et de la minéralisation. L'intensité du serrage fait varier l'épaisseur du gisement (Fig.56) :

- . galerie de recherche : serrage faible, épaisseur 20 à 30 cm ;
- . Trou des Romains : serrage moyen, épaisseur 2 à 3 m ;
- . Chapy : serrage fort, épaisseur 1 m.

Aspect structural

Deux plissements P_1 et P_2 ont été mis en évidence par une analyse structurale entre la galerie de recherche (1 560 m), l'alpage Chapy et la Tête Bernard. Les mesures (stratification, schistosité et failles) ont été reportées sur un fond topographique au 1/250 (précision de l'ordre du mètre) établi au théodolite Wild T0 (pour des raisons de commodité la carte n'est pas présentée dans ce mémoire. Cette étude a permis de représenter dans l'espace les deux plissements (Fig.57) : P_1 à axe subhorizontal NE-SW repris par des ondulations P_2 N 150° 65° S. Cette étude contribue sensiblement à l'étude métallogénique classique.

Minéralogie

La minéralisation se situe à proximité du contact granite porphyroïde et calcaires spathiques sombres. Elle est contenue dans ces calcaires, et s'interpose entre deux repères stratigraphiques (Fig.58) :

- au toit, une couche de pyrite diffuse de 10 cm d'épaisseur maximale,
- au mur, un niveau à crinoïdes.

Le plissement P_1 perturbe ou fait disparaître cette séquence.

Par ordre décroissant d'importance; la minéralisation se compose de :

- barytine blanche laiteuse, saccharoïde ;
- quartz blanc laiteux, en masse décimétrique irrégulière ou en cristaux disséminés dans la minéralisation ; il forme avec la barytine, la gangue de la minéralisation ;
- fluorine grise, translucide, dessinant des plages dans la barytine,
- galène (argentifère) en cristaux millimétriques en tache dans la barytine et la fluorine ;
- blende mielleuse en petits cristaux ($<1/2$ mm), disséminée dans la minéralisation, marquant un litage parallèle à la stratification ;

- pyrite en petits cristaux, disséminée dans la masse ;
- minéraux accessoires : bournonite, réalgar, stibine et tétraédrite.

Remarque : la réaction de la blende au rayonnement ultra violet est surprenante : teinte jaune orangé pendant l'émission des ultra-violets, qui persiste longtemps après arrêt du rayonnement. Nous avons observé également le phénomène de triboluminescence sur des produits d'altération de la blende. L'origine du phénomène de rémanence peut être rattachée à la présence d'éléments en traces (par exemple Y) dans le réseau cristallin de la blende et à la déformation de son réseau cristallin. Cette vérification reste à faire.

Sections polies

L'observation de sections polies a montré l'existence d'exsolution de bournonite (Cu, Pb, Sb, S_3) lamellaire dans la galène (Photo 8). La bournonite s'exprime dans les gisements de faible température et dont la teneur en argent est faible. La galène polarise fortement, ce qui indique que l'antimoine et l'arsenic sont insérés dans le réseau cristallin de la galène.

Géophysique

Nous avons indiqué sur la carte au 1/25 000 la distribution des affleurements de la minéralisation. Ils sont sporadiques à cette échelle kilométrique. Pour réaliser la liaison entre les affleurements nous avons effectué une étude géophysique électrique par résistivité, en nous basant sur le principe que certaines structures minéralisées présentent des contrastes de résistivité notables avec leur environnement. Cela est vrai pour les structures dites "résistantes" telles que les structures à quartz, barytine et fluorine. C'est le cas du gisement du Trou des Romains. Les profils ont été réalisés sur les indices du Trou des Romains et de l'alpage Chapy.

Les courbes que nous obtenons sont peu significatives en ce qui concerne la recherche de la minéralisation.

Les contrastes de résistivité entre la minéralisation et son encaissant sont faibles et ininterprétables.

La méthode employée ne semble pas adaptée à ce type de gisement, les contrastes de résistivité entre la minéralisation et son environnement étant trop faibles. D'autres méthodes peuvent être employées, telles la gravimétrie, qui dans un gisement de barytine (minéral lourd), semble mieux adaptée et la magnétométrie.

Conclusions

La mise en place des minéralisations fluoro-barytiques semble être contemporaine du dépôt des formations qui les contiennent.

Les concentrations reconnues semblent liées à des structures en chenaux (contrôle paléogéographique) en milieu sédimentaire à tendance "littoral confiné évaporitique", à la base d'une série transgressive sur un socle cristallin.

La paragenèse minérale atteste une faible température de formation.

L'extension de la structure minéralisée est kilométrique, mais sa puissance est centimétrique à métrique. L'origine du gisement du Trou des Romains est probablement liée à une sédimentation de type sebkra côtière.

1.6. GISEMENTS AURIFERES

1.6.1. Indice aurifère de Pisse

Situation géographique

X = 411,600 Y = 5981,600 Z = 3 000 m

Carte Mont Rose (Fig.59).

La mine était située à 3 000 m d'altitude au pied du Mont Stoemberg, dans le massif du Mont Rose, mais il ne subsiste des installations minières qu'une ruine en pierre. Aucune entrée de galerie n'est visible.

Cadre géologique

L'encaissant est constitué par des gneiss (gneiss du Mont Rose) et la minéralisation se présente sous la forme d'une série de filons de quartz aurifère concordants avec la schistosité.

Une dizaine de filons sont visibles à l'affleurement et leur puissance varie de quelques centimètres à un mètre, pour une extension de un à dix mètres.

1.6.2. Brusson (se reporter à la thèse d'Annick Richard, 1981).

CHAPITRE II

ETUDES METALLOGENIQUES DES GISEMENTS DE COGNE ET D'HERIN, DANS LES SCHISTES LUSTRES DE LA REGION SUD D'AOSTE

Cette étude fait suite à celles effectuées dans ce secteur par J. Pocachard (1978) et J.L. Garciaz (1979). Elle comporte :

- l'étude géochimique des gisements de magnétite associés aux serpentinites ;
- une campagne de prospections géophysique et géochimique sur le site d'Hérin.

2.1. PRESENTATION DES ENSEMBLES GEOLOGIQUES

Limitée par les vallées de la Doire Baltée, du Grand Eyvia et de Champorcher, la zone étudiée comporte deux grands domaines de la zone interne des Alpes occidentales (Fig. 60 et 61) :

- le domaine austro-alpin ;
- le domaine pennique.

2.1.1. Le domaine austro-alpin

Il est représenté par les klippes du Mont Emilius, du Mont Glacier et de la Tour Ponton. Ces unités, allochtones reposant sur les schistes lustrés piémontais (Dal Piaz, 1971) se rattachent à la nappe de la Dent Blanche.

Ces ensembles se composent de gneiss albitiques, de paraschistes à intercalations de roches vertes et de micaschistes à grenat.

2.1.2. Le domaine pennique ; les schistes lustrés au sens large

D'âge mésozoïque, ils constituent la couverture allochtone des massifs cristallins internes (Mont-Rose et Grand Paradis). Cette puissante série comporte deux grands types pétrographiques de roches :

- les roches vertes : terme général qui désigne les roches basiques et ultrabasiques d'origine magmatique, volcanique et volcano-sédimentaire. Cesont essentiellement des serpentinites, des prasinites, des amphibolites, des chloritoschistes, des métagabbros et des metabasaltes;
- les schistes lustrés sont constitués de roches sédimentaires métamorphisées : calcschistes, micaschistes plus ou moins quartzeux, quartzites, calcaires dolomitiques.

G.V. Dal Piaz (1971) et G. Elter (1971) distinguent, en fonction de la position structurale, des caractères pétrographiques et de leur origine, deux sous-ensembles dans les schistes lustrés s.l. :

- une unité d'origine externe (ou occidentale) : la zone du Combin ;
- une unité d'origine interne (ou orientale) : la zone de Zermatt-Saas-Fee.

2.1.2.1. La zone du Combin

Elle est représentée dans la vallée de Cogne, intercalée dans la série de Zermatt-Saas-Fee.

Elle comprend :

- un ensemble pré-ophiolitique formé de quartzites (Trias inf.), calcaires dolomitiques (Trias) et calcschistes (Lias) ;
- une série à caractère ophiolitique constituée de calcschistes et de roches vertes interstratifiées (prasinites) schistes chloriteux, métagabbros, ovardites et serpentinites).

La prédominance des métasédiments, par rapport aux roches vertes, est très marquée ; ces dernières se présentent sous la forme d'écailles tectoniques, intercalées dans la série métasédimentaire.

2.1.2.2. La zone de Zermatt-Saas-Fee

Elle se différencie, pétrographiquement, de la série du Combin par la prédominance des roches vertes sur les métasédiments.

La série métasédimentaire, beaucoup plus réduite et d'âge probablement plus récent que son équivalent de la zone du Combin, se compose ici de micaschistes plus ou moins quartzeux et de quartzites. Les quartzites, interprétées comme d'anciennes radiolarites, sont souvent manganésifères.

Les roches vertes sont représentées par des serpentinites, des métagabbros et des metabasaltes.

Les serpentinites présentent deux modes de gisement, soit sous la forme d'une véritable portion de croûte océanique (écaille du Mont Avic), soit sous la forme de lentilles de petite taille associées généralement à des contacts tectoniques.

Les métagabbros sont spatialement corrélés aux serpentinites du Mont Avic.

Les metabasaltes sont localisés plus haut dans la séquence ophiolitique, interstratifiés dans les métasédiments.

Les deux unités diffèrent aussi par leur évolution métamorphique :

- la zone du Combin a subi un métamorphisme post-oligocène de faciès schistes verts ;
- la zone de Zermatt-Saas-Fee montre la surimposition du métamorphisme schistes verts sur des paragenèses éclogitiques et de schistes bleus datés du Crétacé supérieur.

Les imbrications observées entre les deux zones dans la vallée de Cogne résultent de mouvements tectoniques postérieurs au métamorphisme de faciès schistes bleus (G.V. Dal Piaz 1972, Bocquet J., 1974).

2.1.2.3. Style tectonique

Les schistes lustrés s.l. sont caractérisés par l'écaillage, le replissement et l'imbrication des différentes formations qui les composent (serpentinites, métasédiments, métavolcanites).

Les cisaillements sub-horizontaux, les plis couchés à déversement NNW et la foliation minéralogique très marquée caractérisent ces formations.

2.2. METALLOGENIE REGIONALE

La série des schistes lustrés s.l. comporte trois types de minéralisations qui sont associées strictement à l'un des termes de la séquence ophiolitique, à savoir :

la magnétite : des gisements existent dans les deux zones structurales des schistes lustrés. Dans tous les cas, ils sont associés aux serpentinites et la magnétite est le seul minerai présent.

Les pyrites cuprifères, liées aux métavolcanites de la couverture volcano-sédimentaire des serpentinites de la zone de Zermatt-Saas Fee.

Le manganèse, associé aux métaradiolarites de la zone de Zermatt-Saas-Fee.

Les klippes austro-alpines sont dépourvues de minéralisations connues.

2.3. LES GISEMENTS DE MAGNETITE

Ils sont tous associés aux serpentinites. Ces dernières sont constituées essentiellement d'antigorite, de chrysotile. La magnétite est toujours présent en minéraux accessoires. Des faciès plus locaux comprennent de la chlorite, des olivines de recristallisation, des clinopyroxènes reliques ou de la calcite (Garciaz, 1979). Zoloyev (1967) indique pour des serpentinites fortement serpentinisées la composition chimique suivante :

Al_2O_3	=	1,26 %
CaO	=	0,3 %
Fe_2O_3	=	7 %
MgO	=	39 %
SiO_2	=	39 %
TiO_2	=	0,05 %
P. f	=	12,5 %

Pour les 60 échantillons de roches de la région étudiée nous obtenons :

Al_2O_3	=	3,6 %
CaO	=	1,2 %
Fe_2O_3	=	7,5 %
MgO	=	38,3 %
SiO_2	=	39,5 %
TiO_2	=	0,10 %
P. f	=	12 %

Seul Al_2O_3 diffère fortement, ce qui est lié à l'origine des roches. Cette origine est magmatique comme l'indiquent les teneurs en nickel et en chrome. En effet, Faust et al. (1956) considèrent que certaines serpentinites sont d'origine magmatique lorsque les teneurs en chrome et en nickel sont supérieures à 100 ppm.

Pour les roches étudiées, nous avons :

	Moyenne	Minimum	
Cr ppm	1 847	68) Zone de Zermatt-Saas-Fee
Ni ppm	1 647	160	
Cr ppm	2 198	428) Zone du Combin
Ni ppm	1 597	560	

Un seul échantillon provenant de la mine de Cogne, présente une teneur inférieure à 100 ppm : 68 ppm Cr (577 ppm Ni).

La composition originelle est considérée comme lherzolitique (G.V. Dal Piaz, 1971). Ces roches se distinguent des autres types de péridotites (harzburgites et dunites) des séries ophiolitiques, par la présence, en proportion beaucoup plus élevée, de clinopyroxènes. Afin d'estimer la composition initiale des serpentinites, il est nécessaire de recalculer les données après soustraction de la perte au feu, car on peut considérer que la serpentinitisation ne s'effectue qu'avec un apport d'eau (Coleman, 1977).

L'utilisation du rapport $MgO/MgO + FeO$ calculé après soustraction de la perte au feu et conversion de Fe_2O_3 en FeO , permet de tenir compte de l'abondance en clinopyroxène dans la roche originelle, ce rapport étant pratiquement égal dans les orthopyroxènes et les olivines des péridotites.

Il est de 0,86 dans les dunités et de 0,85 dans les harzburgites et diminue dans les lherzolites (0,83) (Coleman, 1977, Boudier, 1972).

Les moyennes obtenues sur les échantillons du Val d'Aoste indiquent :

0,82 dans la zone de Zermatt-Saas-Fee ;

0,83 dans la zone du Combin.

Teneur en alumine

Elle est de 0,89 % et 0,35 % dans les harzburgites et les dunités. Elle atteint 3,6 % dans les lherzolites (Coleman, 1977). Les moyennes obtenues sont de 3,7 % dans la zone de Zermatt-Saas-Fee et de 4,7 % dans la zone du Combin.

Rapport MgO/SiO_2

Il est de 1,23 dans les dunités et de 1,02 pour les harzburgites. Des valeurs plus faibles sont caractéristiques des lherzolites (Coleman, 1977).

Ce rapport est de 0,98 dans la zone du Combin et de 0,96 dans la zone de Zermatt-Saas-Fee.

Ces observations confirment la nature lherzolitique du matériel original des serpentinites.

2.3.1. Le gisement de Cogne

2.3.1.1. Contexte pétrographique (Fig. 62 et 63)

Ce gisement, exploité jusqu'en 1979, est situé dans les serpentinites de la zone du Combin.

L'écaïlle de serpentinites, d'une puissance moyenne de 100 m, affleure au niveau de Montzalet sur plus de 1 000 m d'extension. Elle repose sur une épaisse formation de calcaires dolomitiques triasiques ; le contact entre les deux ensembles est de nature tectonique et a une direction moyenne $N40-30^{\circ}N$.

Le toit est constitué de calcschistes micacés bruns ; le contact avec les serpentinites est marqué par un niveau décimétrique de quartzites noires manganésifères et par une bordure irrégulière de nature rodingitique.

Ce niveau est interprété comme une bordure de réaction métasomatique due au métamorphisme de basse température (G.V. Dal Piaz, 1971). Ce métasomatisme est lié au processus de serpentinitisation et de mise en place des serpentinites, et se traduit par un enrichissement très important de ces roches en calcium, libéré lors de la serpentinitisation (Coleman, 1977). Les minéraux produits sont essentiellement des silicates calciques de métamorphisme (grenat grossulaire, diopside, actinote, épidote, chlorite).

La série complète est replissée, le déversement s'effectuant vers le SE (G. Elter, 1971). Le flanc inverse d'épaisseur très réduite affleure au niveau de Montzalet (Fig. 62).

2.3.1.2. Géométrie du gisement (Fig. 64)

Le corps minéralisé affleurerait au niveau de Liconi, à 2 500 m d'altitude, où les travaux ont débuté. L'exploitation s'est ensuite étendue en profondeur, depuis les chantiers Colonna et Costa del Pino, jusqu'au niveau 2 168 m.

L'amas principal mesurait 600 m pour une puissance moyenne de 50 m.

Sa direction est parallèle à celle de la schistosité des roches encaissantes. Cette direction est en surface $N40-30^{\circ}NW$. En profondeur le pendage s'accroît pour s'inverser à partir de la côte 2 200 m ; l'axe du pli, correspondant à cette flexure, est orienté E-W et subhorizontal (Garciaz, 1979).

Une seconde phase de plissement, orienté N-S avec prolongement fort vers le nord, détermine la forme en cuillère du gisement.

Les concentrations de magnétite sont le plus généralement localisées à la base des serpentinites ; cependant le niveau 2 246 montre une épaisseur très réduite des serpentinites au toit du gisement (Fig. 65).

2.3.1.3. Etude géochimique

2.3.1.3.1. Nomenclature utilisée

Les données analytiques sont séparées en deux groupes en fonction de leur teneur en fer total ; nous avons ainsi défini deux populations :

Cs représente les serpentinites ;

Cm représente les minerais.

Pour chaque population, nous considérerons successivement les résultats des études statistiques mono- et multivariées.

Les éléments pris en compte sont :

SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂, MgO, CaO,

Cr, V, Cu, Co, Ni, Mn.

2.3.1.3.2. Analyse Cs

Elle regroupe les serpentinites non minéralisées. La majorité des échantillons provient de l'intérieur de la mine ; le complément est fourni par les roches de Montzalet et de Larcinaz.

2.3.1.3.2.1. Etude statistique monovariée

Tableau des moyennes, écarts-types, variabilités géologiques.

	Moyenne	Ecart-type	Variabilité géologique = $\frac{s}{\bar{x}}$
Al ₂ O ₃	4,32 %	5,46	1,26
CaO	0,82 %	1,28	1,58
Fe ₂ O ₃	6,85 %	2,11	0,30
MgO	38,2 %	3,1	0,08
SiO ₂	39,0 %	3,4	0,08
TiO ₂	0,07 %	0,07	0,98
Mn	1 261 ppm	672	0,53
V	54 ppm	32	0,58
Ni	1 646 ppm	854	0,52
Cu	12 ppm	16	1,35
Cr	1 846 ppm	1 009	0,55
Co	110 ppm	26	0,24

Les variabilités géologiques (= coefficients de variations) reflètent les dispersions des valeurs analytiques pour chaque élément considéré. Cette dispersion est liée aux phénomènes géochimiques ayant affecté les échantillons.

On considère que si :

$\frac{s}{\bar{x}} < 0,5$, l'élément varie faiblement ;

$0,5 < \frac{s}{\bar{x}} < 1$, l'élément varie modérément ;

$\frac{s}{\bar{x}} > 1$, l'élément varie fortement.

Variabilités géologiques classées par ordre croissant :

MgO	SiO ₂	Co	Fe ₂ O ₃	Ni	Mn	Cr	V	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cu	CaO
0,08	0,08	0,24	0,30	0,52	0,53	0,54	0,58	0,98	1,26	1,36	1,58

Nous pouvons distinguer trois groupes d'éléments :

MgO, SiO₂, Fe₂O₃, Co : variabilité faible ;

Ni, Mn, Cr, V, TiO₂ : variabilité modérée ;

Al₂O₃, Cu, CaO : variabilité forte.

Les valeurs très faibles de MgO et SiO₂ soulignent la composition minéralogique simple et homogène des serpentinites ; en effet ces roches sont constituées essentiellement de chrysotile et d'antigorite.

La dispersion minime de Fe₂O₃ montre que la teneur en fer est remarquablement stable ; ce fer peut être lié aux serpentines, comme le suggère le regroupement avec MgO et SiO₂, ou sous la forme de magnétite.

Le cobalt, élément en trace le moins dispersé, semble lié à l'un de ces deux minéraux. L'hétérogénéité de la distribution de la calcite, présente dans la roche en remplissage dans les microfissures, explique la variabilité extrême de CaO. Le même phénomène peut être invoqué dans le cas du cuivre (sulfures rares associés à des fractures tardives).

Distribution des éléments

L'examen des types de distribution, par l'intermédiaire des coefficients d'asymétrie et d'aplatissement, peut se révéler utile pour la compréhension des comportements et des répartitions des éléments.

Deux grands types de distribution des éléments dans les roches sont observés : lognormale et normale.

La première est plus spécialement invoquée dans le cas des éléments en traces ; la seconde semble s'appliquer aux éléments majeurs et parfois aux éléments en traces accompagnant un élément majeur (Lepeltier, 1969).

Les propriétés de la loi normale impliquent une valeur de 0 pour le coefficient d'asymétrie ($=\delta_1$) et de 3 pour le coefficient d'aplatissement ($=\delta_2$). Les distributions lognormales, fortement étirées vers les valeurs fortes, amènent des valeurs positives pour les deux coefficients.

A Cogné, trois éléments semblent distribués lognormalement :

	δ_1	δ_2
Cu	2,2	4,5
Al ₂ O ₃	2,1	3,1
CaO	2,2	4,1

2.3.1.3.2.2. Etude statistique multivariable

Dendrogramme des corrélations positives (Tableau 2a et Fig. 66).

Il s'obtient en classant les corrélations positives par valeurs décroissantes. Les éléments sont ensuite regroupés sur un diagramme ayant pour ordonnées les valeurs de la corrélation. Chaque nouvel élément est incorporé dans la grappe, en ayant soin de le placer sur l'axe des abscisses à côté de l'élément avec lequel il est le plus fortement corrélé.

L'interprétation s'effectue en considérant que les associations possédant un coefficient :

- . > 0,60 sont très fortes et traduisent un phénomène géochimique majeur ;
- . compris entre 0,60 et 0,40 traduisent un phénomène secondaire ou plus complexe ;
- . < 0,40 ne sont pas significatives ; les éléments sont considérés comme indépendants.

A Cogné, les 12 éléments considérés se répartissent en deux grappes et deux éléments indépendants.

Les fortes corrélations observées entre Ni, Cr et Co traduisent les affinités géochimiques de ces éléments. Cette grappe se rattache à celle des silicates (MgO et SiO₂) et à Fe₂O₃.

La seconde grappe regroupe Al₂O₃, TiO₂, V et CaO ; les deux associations Al₂O₃, TiO₂ et V, CaO sont réunies par la corrélation entre TiO₂ et V.

Le comportement de vanadium est intéressant du fait de son indépendance avec le fer ; il semble localisé, en partie, dans la calcite.

La corrélation Al₂O₃, TiO₂ est plutôt le reflet d'une association minéralogique que d'une substitution de Al par Ti dans les minéraux alumineux. Ces derniers sont des chlorites qui apparaissent dans les serpentinites dans les zones très tectonisées. Elles sont en général associées à des minéraux titanifères (titanoclinohumite, sphène).

Les deux éléments qui ne montrent aucune corrélation significative sont le cuivre et le manganèse. Le premier est lié à de rares sulfures présents dans la mine et le second se comporte vraisemblablement de façon complexe (partage entre plusieurs phases).

Etude des facteurs

Notion de communauté

La communauté (ou qualité) d'une variable avec un facteur est égale au carré de sa composante (= corrélation) avec ce facteur. La somme des communautés d'une variable avec tous les facteurs est égale à 1.

On considère qu'une variable est significative au niveau d'un facteur si sa communauté avec ce facteur est supérieure à 0,16. Si elle est supérieure à 0,60 on peut estimer que le phénomène responsable de la dispersion de la variable est simple et unique.

Tableau des communautés (Tableau 2b)

Communautés cumulées sur les cinq premiers facteurs classées par ordre décroissant.

Cu	Mn	V	MgO	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	Co	TiO ₂	SiO ₂	Cr	Ni
0,99	0,95	0,92	0,91	0,90	0,90	0,89	0,88	0,85	0,85	0,81	0,75

Toutes les variables présentent des communautés cumulées sur les cinq premiers facteurs supérieures à 0,60, ce qui montre que l'analyse explique de façon satisfaisante les dispersions des éléments. En excluant les deux éléments indépendants (Mn et Cu), le chiffre de 0,60 est atteint pour les autres variables, en ne cumulant les communautés que sur les facteurs 1, 2 et 3. Ce fait montre que peu de phénomènes géochimiques interviennent dans la distribution des éléments.

Description des facteurs

Facteur 1 - Variance = 41 %.

Le poids de variance de ce facteur est très élevé ; il traduit en conséquence un phénomène géologique majeur. En effet cinq éléments présentent des communautés supérieures à 0,60 : (Al, Ti, Mg, Si et Ni) et deux (Cr et Co) à 0,50. Le facteur 1 oppose les serpentines (Mg, Si, Ni, Cr, Co) et les chlorites. Il traduit les recristallisations tardives subies par certains échantillons dans des zones tectonisées.

Il est intéressant de noter la communauté très faible (0,002) de Fe, ce qui indique que le fer n'est pas associé aux minéraux du groupe des serpentinites mais se trouve sous forme de minéraux indépendants (magnétite).

Le nickel semble exclusivement incorporé dans les serpentines, dans laquelle il se trouve associé au chrome et au cobalt. Mais ces deux derniers éléments, au vu de leur communauté plus faible, présentent un comportement plus complexe.

Facteur 2 - Variance = 19,4 %.

Il décrit le comportement de CaO et V (communautés > 0,60).

Cette association traduit le chimisme de la calcite.

Les communautés des autres éléments sont très faibles confirmant ainsi le caractère indépendant de la calcite.

Facteur 3 - Variance = 14 %.

Il souligne la présence de magnétite (communauté du fer > 0,60) et discrimine en partie le manganèse et le cobalt.

Le fer semble donc totalement exprimé sous la forme d'oxyde et les seuls traces associées sont le manganèse et le cobalt. Toutefois, il apparaît que ces deux éléments ne sont pas exclusivement associés à la magnétite : le cobalt se partage entre la magnétite et les silicates (en proportion plus importante dans les serpentines, semble-t-il) : une partie du manganèse est incorporée dans la magnétite (en substitution de Fe^{++}), l'autre partie restant indépendante.

Facteur 4 - Variance = 8 %.

Il confirme l'indépendance géochimique du cuivre (communauté = 0,81) ; les autres éléments n'étant pas significatifs au niveau de ce facteur.

Facteur 5 - Variance = 5,5 %.

Seul Mn est discriminé par ce facteur (communauté = 0,32) ; ceci traduit le comportement indépendant d'une partie du manganèse.

Plans factoriels les plus discriminants

Ils sont déterminés par le calcul des communautés cumulées sur les deux facteurs les plus significatifs pour une variable.

Ainsi, dans le cas de l'analyse C.s, le plan des facteurs 1 et 3 permet-il de décrire au mieux le comportement du cobalt.

Ce calcul est nécessaire lorsque peu de variables sont fortement corrélées avec un facteur. Dans cette analyse, trois éléments seulement sont dans ce cas : Mn, Cr, Co, et les plans factoriels les plus discriminants sont respectivement 3 + 5, 1 + 2 et 1 + 3.

Projection des variables sur les plans des facteurs

Les variables dont la communauté cumulée sur les deux facteurs considérés est inférieure à 0,15 ne sont pas représentées.

Projection sur le plan des facteurs 1 et 2 (Fig. 67)

Ce diagramme permet de décrire les associations suivantes :

- . Si, Cr, Ni, Co qui caractérise les serpentines.
Le magnésium est légèrement séparé de cet ensemble ce qui suggère la présence d'un autre minéral magnésien que les serpentines.
- . Al, Ti : ce pôle chlorite-titanoclinohumite s'oppose sur l'axe 1 au pôle serpentine ; cette opposition traduit les recristallisations métamorphiques locales existant au sein des serpentinites.

La calcite, associée au vanadium, est décrite par l'axe 2.

Cet axe calcite est orthogonal à l'axe serpentine, ce qui montre l'indépendance géochimique entre ces deux minéraux.

La magnétite est partiellement discriminée par l'axe 2 mais ce minéral sera décrit sur les projections faisant intervenir l'axe 3.

Projection sur le plan des facteurs 1 et 3 (Fig. 68)

Ce diagramme fait apparaître la magnétite, discriminée par l'axe 3 ; Le manganèse lui est associé. La seconde direction caractérise l'opposition serpentine-chlorite. Le magnésium est cette fois associé très étroitement au silicium ; il semble donc que cette projection permet la représentation la plus significative des serpentines. Les éléments en traces associés sont le chrome (le plus étroitement), le nickel et le cobalt à un niveau moindre. La position de ce dernier suggère un partage entre la serpentine et la magnétite.

Projection sur le plan des facteurs 2 et 3 (Fig. 69)

Ce plan est le plus discriminant pour la magnétite ; elle se caractérise par son association avec Co et Mn comme le laissait présager les observations antérieures.

Le second axe décrit le comportement indépendant d'une partie du magnésium et l'oppose à la calcite et à la silice. Ceci confirme la présence d'un autre minéral magnésien que les serpentines. Ce minéral pourrait être la brucite ou la dolomite et n'a piégé apparemment aucun élément de transition.

2.3.1.3.2.3. Bilan de l'analyse Cs

L'analyse factorielle a permis de préciser les associations suivantes :

Al, Ti (chlorite, titanoclinohumite)
Fe, Co, Mn (magnétite)
Mg, Si, Ni, Cr (Co) (serpentines)
Cu (sulfures)
Ca, V (calcite)

Seuls deux pôles (serpentine et chlorite) sont opposés sur l'une des projections, ce qui montre l'importance des phénomènes de recristallisations dans les serpentinites.

Les serpentines (antigorite, chrysotile) sont caractérisées par leurs associations avec Ni, Cr, Co ; ces trois éléments se substituant à Fe ou Mg dans ces minéraux.

La présence de brucite ou de dolomite est possible ; aucun élément en traces ne s'associe à ce minéral.

La magnétite contient uniquement du manganèse et du cobalt.

Ces deux éléments ne sont pas systématiquement associés à la magnétite mais sont en partie indépendants (pour Mn) ou inclus dans les serpentines (pour Co).

La calcite contient la plus grande partie du vanadium contenue dans la roche.

Le cuivre montre une indépendance géochimique (sulfures).

2.3.1.3.3. Analyse Cm

Cm rassemble les échantillons minéralisées de la mine de Cogne. Tous les échantillons proviennent des différents niveaux visitables de la mine (1978).

2.3.1.3.3.1. Etude statistique monovariante

Tableau des moyennes, écarts-types, variabilités géologiques.

	Moyenne	Ecart -type	Variabilité géologique
Al ₂ O ₃	0,68 %	0,63	0,93
CaO	1,6 %	2,3	1,43
Fe ₂ O ₃	61,6 %	21,1	0,34
MgO	15,3 %	7,3	0,47
SiO ₂	15,9 %	10,1	0,64
TiO ₂	0,04 %	0,02	0,48
Mn	2 283 ppm	912	0,40
V	158 ppm	384	2,44
Ni	340 ppm	402	1,18
Cu	55 ppm	89	1,61
Cr	536 ppm	629	1,17
Co	305 ppm	100	0,32

Variabilités classées par ordre croissant

Co	Fe ₂ O ₃	Mn	MgO	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr	Ni	CaO	Cu	V
0,32	0,34	0,40	0,47	0,48	0,64	0,93	1,17	1,18	1,43	1,61	2,44

Les trois groupements d'éléments distingués :

Co, Fe₂O₃, Mn, MgO, TiO₂ : éléments peu variants ;
 SiO₂, Al₂O₃ : éléments variant modérément ;
 Cr, Ni, CaO, Cu, V : éléments variant fortement ;

différent de ceux définis dans l'analyse Cs.

Les valeurs sont globalement plus élevées, ce qui est dû à la plus grande variation de composition chimique (Fe₂O₃ varie de 17,5 à 87 %). En conséquence, la proportion de serpentines montre aussi une dispersion plus grande. Quatre éléments en traces (Cr, Ni, Cu, V) sont fortement variants et s'opposent au cobalt qui présente la plus faible valeur de variabilité. Ce dernier semble associé à la magnétite.

2.3.1.3.3.2. Etude statistique multivariante

Dendrogramme des corrélations (tableau 3a et Fig. 70).

Le dendrogramme montre une opposition très tranchée entre la grappe minéral dans laquelle se regroupent le fer et le cobalt et celle des silicates (Al, Ti, Mg, Si, Cr, Ni, Ca).

A l'intérieur de la grappe silicates nous pouvons distinguer :

- . une super-grappe serpentines (Mg, Si, Ni, Cr) ;
- . le groupe Al, Ti (chlorites, titanoclinohumites) qui se rattache à la précédente par la corrélation TiO₂-Ni (0,563).

La corrélation Ca-V n'est pas observée ; le calcium est associé ici aux serpentines.

Les éléments Mn, V, Cu ne montrent pas de corrélations significatives.

Etude des facteurs

Tableau des communautés (tableau 3b). Communautés cumulées classées par ordre décroissant.

Fe ₂ O ₃	Mn	Ni	MgO	V	SiO ₂	Cr	TiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Cu	Co
0,98	0,96	0,95	0,93	0,92	0,91	0,91	0,85	0,82	0,79	0,79	0,78

Toutes les variables possèdent une communauté cumulée sur les cinq premiers facteurs supérieure à 0,60. L'étude de ces facteurs est suffisante pour expliquer les dispersions des variables.

La valeur de 0,60 est obtenue sur les deux premiers facteurs pour 10 des 12 variables considérées ; Mn et V étant discriminés par les facteurs 3 et 4.

Description des facteurs

Facteur 1 - Variance = 46 %.

Il discrimine les éléments Fe, Co, Mg, Si, Ni, Cr (communautés > 0,60) et traduit l'opposition entre la magnétite (Fe-Co) et l'antigorite (Mg, Si, Cr, Ni). A un degré moindre, il est significatif pour Al, Ca et Ti.

Facteur 2 - Variance = 16 %.

Aucune communauté > 0,60 sur ce facteur.

Les valeurs les plus élevées sont obtenues pour Al, Ti et Cu ; le pôle chlorite s'opposant au pôle sulfures.

Facteur 3 - Variance = 9,4 % . Facteur 4 - Variance = 8,8 %.

Ces deux facteurs décrivent le manganèse et le vanadium ; qui semblent indépendants comme le laissait prévoir l'étude du dendrogramme.

Les communautés des autres éléments sont très faibles.

Facteur 5 - Variance = 8 %.

Le poids de variance de ce facteur est faible ; deux éléments sont partiellement discriminés et associés : Cr et Mn.

L'indépendance de la partie du chrome qui ne semble pas associé aux serpentines est intéressante à noter ; la réalisation des projections comportant ce facteur sera nécessaire pour l'expliquer.

Plans factoriels les plus discriminants

Elément	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Cu
Plan factoriel	1-2	1-2	2-1	1-2	2-1	2-3
	Co	Ni	Cr	MgO	Mn	V
	1-3	1-5	1-5	1-5	4-3	4-3

Il apparaît que, pour caractériser le minéral et l'encaissant, les projections comportant les facteurs 1, 2 et 3 sont suffisantes. Toutefois le facteur 5 intervient pour 3 éléments (Ni-Cr-Mg), la projection sur le plan des facteurs 1 et 5 sera présenté.

Projections des variables sur les plans des facteurs

Plan des facteurs 1 et 2 (Fig. 71)

Cette projection traduit bien l'opposition entre la magnétite et les autres minéraux.

Quatre associations se dégagent :

- Fe-Co : pôle magnétite. Comme dans les magnétites de l'encaissant (analyse Cs), le cobalt est associé à la magnétite.
- Si-Mg : pôle serpentine. Les serpentines piègent le nickel et le chrome comme le montre la proximité entre ces deux associations.
- Al-Ti : pôle chlorite-titanoclinohumite.
Ce pôle, déjà présent dans l'analyse précédente exprime les phénomènes de recristallisations métamorphiques.
- Le pôle sulfure est discriminé par l'axe 2, ce qui marque l'indépendance de cette minéralisation par rapport à la magnétite.

Plan des facteurs 1 et 3 (Fig. 72)

La magnétite est fortement opposée à tous les autres minéraux qui sont regroupés (Mg, Al, Ti, Ca, Ni, Cr). L'axe 3 permet de décrire le comportement du vanadium qui est indépendant.

L'association Mn-Cu est peu significative (communautés cumulées = 0,22 et 0,16).

Plan des facteurs 2 et 3 (Fig. 73)

Le pôle chlorite-titanoclinohumite est discriminé par l'axe 2. Les autres éléments (Mn, Cu, V, Ca) sont dispersés sur le diagramme.

Plan des facteurs 1 et 5 (Fig. 74)

Nous avons vu précédemment que ce plan était le plus significatif pour 3 éléments : Ni-Cr-Mg ; c'est pourquoi il est présenté ici.

Il permet de constater la séparation entre Cr-Ni (étroitement associés) et Mg-Si. Aucun élément n'est associé à Ni et Cr. Une faible partie du chrome et du nickel n'est donc pas liée aux serpentinites. Il semble vraisemblable que la magnétite contienne cette partie (cette tendance apparaît sur une projection sur le plan des facteurs 3 et 5, Fig. 75).

2.3.1.3.3.3. Bilan de l'analyse Cm

La magnétite est enrichie en cobalt. Ce fait était observé déjà dans les magnétites accessoires de l'encaissant, mais dans le minéral l'association Mn-Co n'est pas observée.

L'association Ni-Cr-Mg-Si caractérise les serpentines. Toutefois le nickel et le chrome se trouvent pour une faible part dans la magnétite.

La dissociation entre Mg et Si, observée dans l'encaissant, n'apparaît plus dans les roches minéralisées (disparition de la brucite ou absence de dolomite ?).

Al_2O_3 et TiO_2 sont associés (Pôle chlorite).

Cu est indépendant (Pôle sulfures).

La calcite est discriminée mais n'est pas associée au vanadium ; celui-ci n'étant lié à aucun autre élément.

2.3.1.3.4. Conclusions

La liaison génétique magnétite-serpentinite est évidente : les magnétites et serpentines présentent les mêmes associations géochimiques dans l'encaissant et dans les roches minéralisées :

- Serpentes : MgO, SiO₂, Ni, Cr ;
- Magnétites : Fe, Co.

Les nuances à apporter concernent le manganèse et le cobalt.

- Mn est associé à la magnétite dans l'encaissant et pas dans le minerai ;
- le cobalt présent en partie dans les serpentines encaissantes est totalement lié à la magnétite dans le minerai.

2.3.2. Les gisements de la zone de Zermatt-Saas-Fee

Les différents gisements de cette région ont été décrits dans le chapitre 2.1. (inventaire minier du Val d'Aoste). Nous nous bornerons ici à rappeler leurs caractères généraux.

2.3.2.1. Caractères généraux

Ces gisements sont tous localisés dans la grande écaille de serpentinites du Mont-Avic.

Ces gisements ont pour caractères communs, d'un point de vue pétrographique et structural (Garciaz, 1979) :

- la magnétite est strictement associée aux minéraux du groupe des serpentines ; elle est finement cristallisée ;
- les amas sont allongés dans la schistosité des roches encaissantes ;
- les gisements sont localisés dans des zones très tectonisées, les déformations semblent favoriser la concentration de la magnétite ;
- les minéraux fémiques (olivines, pyroxènes) sont caractéristiques des zones à magnétite.

2.3.2.2. Etude géochimique

2.3.2.2.1. Nomenclature utilisée

Deux populations sont définies :

- Es représentent les serpentinites ;
- Em représentent les magnétites.

Les concentrations en magnétite sont plus faibles qu'à Cologne ; pour cette raison, la première analyse regroupe les deux populations. Nous considérerons ensuite les serpentinites et les minerais séparément.

2.3.2.2.2. Analyse Em + Es

2.3.2.2.2.1. Etude statistique monovariante

Tableau des moyennes, écarts-types et variabilités géologiques.

	Moyenne	Ecart-type	Variabilité géologique
Al ₂ O ₃	2,96 %	2,55	0,86
CaO	1,94 %	3,04	1,57
Fe ₂ O ₃	17,23 %	18,36	1,06
MgO	32,75 %	8,70	0,26
SiO ₂	36,12 %	8,38	0,23
TiO ₂	0,265%	1,03	3,88
Mn	926 ppm	441	0,47
V	151 ppm	205	1,36
Ni	1 359 ppm	764	0,56
Cu	42 ppm	61	1,48
Cr	2 303 ppm	1 329	0,57
Co	74 ppm	47	0,63

Variabilités classées par ordre croissant

SiO ₂	MgO	Mn	Ni	Cr	Co	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	V	Cu	CaO	TiO ₂
0,23	0,26	0,47	0,56	0,57	0,63	0,86	1,06	1,36	1,48	1,57	3,88

- . Eléments variant faiblement : SiO₂, MgO, Mn ;
- . Eléments variant modérément : Ni, Cr, Co, Al₂O₃ ;
- . Eléments variant fortement : Fe₂O₃, V, Cu, CaO, TiO₂.

Les éléments constitutifs des serpentines (MgO et SiO_2) varient faiblement malgré la présence des échantillons minéralisés. Ces derniers influencent fortement la variabilité de Fe_2O_3 .

Le nickel, le chrome et le cobalt sont regroupés (variabilités modérées).

La présence d'échantillons riches en minéraux titanifères (titanoclinohumite, sphène, ilménite) explique la variabilité extrême de TiO_2 .

Les associations entre les éléments seront discutées à l'aide de l'analyse factorielle.

2.3.2.2.2. Etude statistique multivariable

Dendrogramme des corrélations positives (Tableau 4a et Fig.76)

Les 12 éléments se répartissent en trois grappes et deux éléments indépendants :

MgO , Co , SiO_2 sont fortement corrélés. A cette grappe serpentine se rattache le nickel et le chrome.

La corrélation entre Fe_2O_3 et V indique la présence de cet élément dans la magnétite. Cette dernière est rattachée à la grappe serpentine par l'intermédiaire du chrome.

La dernière association est constituée de Mn , Ti , Al et constitue la grappe chlorite. Le niveau de corrélation est faible, ce qui traduit un phénomène secondaire ou complexe.

Les deux éléments indépendants sont le cuivre et le calcium.

Etude des facteurs

Tableau des communautés (Tableau 4b)

Communautés cumulées sur les cinq premiers facteurs classés par ordre croissant :

Cu	Fe_2O_3	CaO	Mn	MgO	Cr	SiO_2	Co	Ni	TiO_2	Al_2O_3	V
0,98	0,97	0,96	0,93	0,90	0,90	0,89	0,87	0,86	0,80	0,69	0,65

Deux éléments sont imparfaitement décrits par l'analyse factorielle : Al_2O_3 et V .

Leur comportement est probablement complexe et lié à plusieurs phénomènes géochimiques. Toutefois, leur valeur n'est pas inférieure à la limite de 0,60. Cette limite est atteinte par 10 éléments en ne cumulant que sur les trois premiers facteurs.

Description des facteurs

Facteur 1 - Variance = 38 %.

Il est particulièrement significatif pour MgO et Co qui ne sont discriminés que sur cet axe.

Ces deux éléments s'associent au nickel et à la silice.

Ce pôle serpentine s'oppose au pôle magnétite constitué par Fe_2O_3 et V .

Le chrome habituellement lié à l'un de ces éléments a une communauté nulle sur cet axe.

Facteur 2 - Variance = 19,8 %.

Il souligne le comportement du chrome et l'oppose à l'alumine.

Le calcium, le nickel et le titane sont partiellement discriminés par cet axe.

Facteur 3 - Variance = 14,0 %.

Deux variables seulement sont significatives au niveau de ce facteur :

Mn et TiO_2 .

Cette association traduit sans doute la substitution de Fe^{++} par Mn^{++} dans les minéraux titanifères (ilménite, titanoclinohumite, sphène).

Facteur 4 - Variance = 8,0 %. Facteur 5 - Variance = 6,7 %.

Le poids de variance de ces facteurs est faible. Ils discriminent le calcium et le cuivre.

Plans factoriels les plus discriminants

Elément	Al_2O_3	CaO	MgO	Fe_2O_3	SiO_2	TiO_2	Mn	V	Ni
Plan factoriel	2-3	5-2	<u>1-5</u>	<u>1-2</u>	<u>1-2</u>	3-2	3-4	1-3	1-2
	Cu	Cr	Co						
	5-4	<u>2-4</u>	<u>1-2</u>						

Les facteurs soulignés sont ceux qui présentent avec la variable une communauté supérieure à 0,60.

Il apparaît que l'opposition magnétite-serpentine sera le mieux décrite par le plan 1-2.

Les projections comportant les facteurs 4 ou 5 ne seront pas reproduites, car elles n'intéressent que deux éléments indépendants (Cu et Ca).

Projection des variables sur les plans des facteurs

Plan des facteurs 1 et 2 (Fig. 77)

Ce diagramme met en évidence l'opposition serpentine-magnétite.

Le pôle serpentine, discriminée sur l'axe 1 comporte la silice, le magnésium et le cobalt.

Le pôle magnétite (Fe_2O_3) est isolé ; ceci n'implique pas que les magnétites soient dépourvues d'éléments en traces mais plutôt que ceux-ci (Ni, Cr, V) se partagent entre plusieurs phases.

Une autre association apparaît : Ca-Ti, ce qui suggère l'existence de sphène. Ce minéral, au vu de sa proximité avec le pôle alumineux, est lié aux zones à chlorites des serpentines.

Plan des facteurs 1 et 3 (Fig. 78)

La même opposition serpentine-magnétite apparaît, mais deux éléments en traces semblent s'associer à ces minéraux :

- Ni avec les serpentines (MgO , SiO_2 , Co) ;
- V avec la magnétite (Fe_2O_3).

L'axe 3 permet de confirmer l'association TiO_2 -Mn signalée précédemment et de faire apparaître le cuivre ; celui-ci comme le calcium n'est que partiellement discriminé.

Plan des facteurs 2 et 3 (Fig. 79)

Le chrome est très bien discriminé sur ce diagramme. Il s'associe au nickel, ces deux éléments se trouvant à proximité du fer. Le nickel et le chrome semblent se concentrer en partie dans la magnétite.

Les autres variables sont dispersées et imparfaitement discriminées sauf pour l'association Mn- TiO_2 déjà observée sur la projection précédente.

2.3.2.2.3. Bilan de l'analyse Em + Es

Les regroupements d'éléments sont moins nets que dans le cas du gisement de Cogne. L'échantillonnage qui est représentatif d'une région plus étendue et de différentes zones minéralisées, ainsi que la prise en compte des serpentinites et des minerais sont responsable de ce phénomène.

Néanmoins plusieurs faits se dégagent :

- Le cobalt est étroitement lié aux minéraux du groupe des serpentines.
- Les phénomènes de recristallisation se traduisent par l'association Mn, Ti, Al. Les minéraux titanifères se développent dans les zones chloriteuses et sont enrichis en manganèse.
- Le nickel est observé en association avec la magnétite et les serpentines.
- Le chrome est associé en partie à la magnétite, mais ne montre aucune affinité pour les serpentines.
- CaO (en partie) et Cu sont indépendants (calcite et sulfures).

Les analyses des populations Es et Em préciseront ces conclusions.

2.3.2.2.3. Analyse Es

2.3.2.2.3.1. Etude statistique monovariante

Tableau des moyennes, écarts-types et variabilités géologiques.

Variable	Moyenne	Ecart-type	Variabilité géologique
Al_2O_3	3,3 %	2,5	0,79
CaO	1,48 %	2,5	1,71
Fe_2O_3	8,0 %	2,0	0,25
MgO	37,1 %	3,5	0,09
SiO_2	39,9 %	3,1	0,08
TiO_2	0,12 %	0,16	1,35
Mn	893 ppm	343	0,38
V	67 ppm	29	0,42
Ni	1 598 ppm	532	0,33
Cu	35 ppm	41	1,17
Cr	2 198 ppm	689	0,31
Co	98 ppm	26	0,27

Ce tableau est tout à fait comparable à celui établi pour les serpentinites de Cogne ; seules les valeurs de Cu, TiO_2 et CaO diffèrent sensiblement. Le chimisme des serpentinites - et par conséquent du matériel original, puisque le processus de serpentinitisation ne met en jeu que des réactions d'hydratation (Coleman, 1977) - ne permet pas de distinguer les roches des deux zones.

Variabilités géologiques classées par ordre croissant

SiO_2	MgO	Fe_2O_3	Co	Cr	Ni	Mn	V	Al_2O_3	Cu	TiO_2	CaO
0,08	0,09	0,25	0,27	0,31	0,33	0,38	0,42	0,79	1,17	1,35	1,71

Ce tableau est la réplique de celui des serpentinites de Cogne ; et ici l'opposition entre les éléments du groupe serpentine-magnétite et ceux des autres minéraux (calcite, sulfures, chlorite) est très tranchée.

2.3.2.2.3.2. Etude statistique multivariante

Dendrogramme des corrélations positives (tableau 5a et Fig. 80)

Trois grappes se distinguent :

- Mg, Cr, Ni, Co, Fe forment la grappe serpentine + magnétite. Si est rattaché, mais faiblement à cet ensemble ;
- pôle chlorite-minéraux titanifères : Al-Ti ;
- grappe calcium-manganèse rattachée à la précédente.

Les corrélations de V et Cu ne sont pas significatives.

Au niveau des éléments Mg, Si, Fe, Cr, Ni, Co, Al et Ti, le dendrogramme est similaire à celui des serpentinites de Cogne ; l'association CaO-V étant remplacée par Mn-CaO.

Cette dernière n'est guère concevable dans la calcite ; Mn étant en général associé à Fe dans les roches ignées. Mn est sans doute associé à l'un des minéraux caractéristiques des serpentinites à chlorites.

La corrélation négative entre Fe et Mg n'est pas observée (+ 0,24). Ce fait est important car il pourrait traduire la présence du fer sous deux formes : oxyde ;
en substitution dans les serpentines.

Etude des facteurs

Tableau des communautés des variables avec les cinq premiers facteurs (tableau 5b).

Communautés cumulées classées par ordre décroissant.

Mn	SiO_2	Co	CaO	V	Al_2O_3	MgO	Ni	TiO_2	Cr	Fe_2O_3	Cu
0,95	0,91	0,90	0,89	0,88	0,84	0,83	0,83	0,81	0,80	0,77	0,65

Les dispersions des variables sont correctement décrites par les cinq premiers facteurs.

Description des facteurs

Deux variables seulement possèdent des communautés cumulées supérieures à 0,60 sur l'un des facteurs ; ce qui implique que les dispersions des variables résultent de plusieurs phénomènes géochimiques.

Facteur 1 - Variance = 40,8 %.

Il décrit l'association MgO, Cr, Ni, Co, Fe_2O_3 et l'oppose à CaO, Al_2O_3 , TiO_2 , Mn.

La silice n'est pas discriminée par ce facteur. La présence de plusieurs phases silicatées explique ce phénomène.

Facteur 2 - Variance = 17,0 %.

Il discrimine en partie Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , Mn, V et Co.

Les communautés étant inférieures à 0,60, il est difficile de préciser les associations.

Facteur 3 - Variance = 9,5 %.

La même remarque s'applique à ce facteur. MgO, Ni et CaO sont les mieux représentés.

Facteur 4 - Variance = 8,2 %. Facteur 5 - Variance = 8,0 %.

Ils discriminent partiellement le vanadium et la silice.

L'étude des facteurs montre l'intérêt de déterminer les plans factoriels les plus discriminants ; les variables n'étant corrélées fortement à aucun des facteurs.

Plans factoriels les plus discriminants

Variable	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SiO ₂	TiO ₂
Plan factoriel	1-2	<u>1-3</u>	1-2	1-3	2-5	1-2
	Mn	V	Ni	Cu	Cr	Co
	1-2	2-4	1-3	1-3	<u>1-2</u>	1-2

Les projections comportant les axes 1, 2 et 3 permettent la représentation correcte des principaux phénomènes.

Projection des variables sur les plans des facteursPlan des facteurs 1 et 2 (Fig. 81)

Les variables se dispersent sur ce diagramme ; toutefois deux associations apparaissent nettement :

- Cr, Mg, Ni, qui représente le pôle serpentines ;
- Al₂O₃, TiO₂, pôle chlorite-minéraux titanifères.

Le fer n'est pas franchement opposé au magnésium, ni lié à l'axe orthogonal au pôle serpentine. Il semble que cet élément ne soit pas entièrement sous la forme de magnétite, mais se partage entre deux phases.

Deux éléments sont situés à proximité de Fe₂O₃ : Co et V ; ce dernier n'étant discriminé que par l'axe 2, ce qui montre son indépendance vis-à-vis des serpentines.

Le calcium est décrit par l'axe 1 où il s'oppose à la serpentine. Mn est situé à proximité confirmant la corrélation observée précédemment.

Plan des facteurs 1 et 3 (Fig. 82)

Le pôle chlorite s'oppose au pôle ferrifère. Celui-ci regroupe Fe, Co et Cr, mais ne semble pas significatif du chimisme de la magnétite, au vu de la communauté élevée de Mg avec le facteur 1. Il est probable que Fe n'est pas entièrement sous la forme d'oxyde, ce qui se traduit par un comportement ubiquiste des éléments en traces.

Plan des facteurs 2 et 3 (Fig. 83)

On constate l'opposition entre Fe et Si (Mg) sur l'axe 2 ; le chimisme de la magnétite est caractérisé par sa richesse en vanadium et en cobalt.

Le nickel est sur l'axe orthogonal à celui de la magnétite et n'est pas associé au magnésium mais au cuivre et au calcium. L'association nickel-cuivre est caractéristique des sulfures ; cette minéralisation est indépendante de la magnétite et accompagne la calcite.

2.3.2.2.3.3. Bilan de l'analyse Es

L'analyse factorielle a mis en évidence le comportement ubiquiste des éléments en traces. Cette ubiquité est liée au partage du fer entre la serpentine et la magnétite.

Cette dernière se caractérise par son enrichissement en cobalt et en vanadium, mais seule cette variable est liée uniquement à la magnétite.

Le chrome et le nickel sont préférentiellement incorporés dans les serpentines (plan des facteurs 1 et 2).

Le cobalt se partage entre la magnétite et les serpentines.

Les sulfures sont nickélifères.

Les roches chloriteuses associent Al₂O₃ et TiO₂.

2.3.2.2.4. Analyse Em

Cette analyse concerne les serpentinites minéralisées de la zone de Zermatt-Saas-Fee.

Le cobalt n'est pas pris en compte, les données analytiques se trouvant trop fréquemment au-dessous de la limite de détection des appareils (20 ppm).

2.3.2.2.4.1. Etude statistique monovariante

Tableau des moyennes, écarts-types, variabilités géologiques.

Variable	Moyenne	Ecart-type	Variabilité géologique
Al ₂ O ₃	1,8 %	2,2	1,22
CaO	3,4 %	3,9	1,15
Fe ₂ O ₃	46,6 %	16,2	0,35
MgO	19,0 %	5,4	0,28
SiO ₂	24,1 %	8,5	0,35
TiO ₂	0,7 %	2,0	2,85
Mn	1 031 ppm	649	0,63
V	417 ppm	283	0,68
Ni	604 ppm	889	1,47
Cu	63 ppm	98	1,55
Cr	2 635 ppm	2 392	0,91

Les teneurs des éléments en traces diffèrent fortement de celles des magnétites de Cogne (Zone de Combin).

Les magnétites de Cogne montrent un enrichissement :

- en cobalt (cet élément est absent dans de nombreux échantillons de la zone de Zermatt) ;
- en manganèse (2,2 fois plus) ;

et un déficit :

- en vanadium (2,6 fois moins)
- en nickel (1,8 fois moins)
- en chrome (4,9 fois moins).

Variabilités classées par ordre croissant.

MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Mn	V	Cr	CaO	Al ₂ O ₃	Ni	Cu	TiO ₂
0,28	0,35	0,35	0,63	0,68	0,91	1,15	1,22	1,47	1,55	2,85

- Eléments variant faiblement : MgO, SiO₂, Fe₂O₃
Ils caractérisent la minéralisation et son encaissant (magnétite-serpentes).
- Eléments variant modérément : Mn, V, Cr.
- Eléments variant fortement : CaO, Al₂O₃, Ni, Cu, TiO₂
Les variabilités de CaO, Al₂O₃ et TiO₂ soulignent l'hétérogénéité de distribution des minéraux accessoires (chlorite, calcite, minéraux titanifères).

2.3.2.2.4.2. Etude statistique multivariante

Dendrogramme des corrélations positives (tableau 6a et Fig. 84)

Deux valeurs sont extrêmement élevées : Al-Ti = + 0,96, Ni-Cr = + 0,93.

La première corrélation caractérise l'association chlorite-minéraux titanifères ; la seconde est le reflet de l'affinité géochimique très forte entre le nickel et le chrome. Le fer est rattaché au nickel et au chrome (grappe magnétite) et le manganèse à la grappe chlorite. L'encaissant montrait déjà cette association.

Les deux grappes sont associées par l'intermédiaire de la corrélation Ni-Mn, mais le nickel n'est pas corrélé au titane ou à l'alumine.

La troisièmegrappe regroupe Mg, CaO, SiO₂ et V. Le niveau de corrélation élevée entre Ca et Si montre la présence de silicates calciques (pyroxènes ou amphiboles) associés aux serpentines.

Le cuivre est indépendant (sulfures).

Etude des facteurs

Tableau des communautés des variables avec les cinq facteurs principaux (Tableau 6b).

Communautés cumulées sur les cinq facteurs principaux classées par ordre décroissant.

Fe ₂ O ₃	Cr	TiO ₂	Mn	SiO ₂	Ni	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	V	Cu
0,996	0,99	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97	0,96	0,89	0,83	0,82

Les valeurs obtenues sont très élevées ; le seuil de 0,60 est atteint en cumulant sur les trois facteurs principaux pour toutes les variables, sauf le vanadium.

Description des facteurs

Facteur 1 - Variance = 38,9 %.

Quatre variables sont entièrement discriminées (communauté > 0,60) sur ce facteur : SiO_2 , Fe_2O_3 , Ni et Cr ; SiO_2 s'opposant à l'ensemble Fe_2O_3 , Ni, Cr. Cet axe permet d'opposer le minerai aux silicates.

Facteur 2 - Variance = 26,3 %.

Le pôle chlorite regroupe l'alumine, le titane et le manganèse (communautés supérieures à 0,60). Les autres variables sont partiellement discriminées.

Facteur 3 - Variance = 11,8 %.

Il souligne le comportement du magnésium qui s'associe au cuivre et s'oppose au calcium.

Facteur 4 - Variance = 10,1 %.

Deux éléments sont significatifs au niveau du facteur 4 : V et Cr.

Facteur 5 - Variance = 7,2 %.

Il ne discrimine aucune variable.

Plans factoriels les plus discriminants

Variable	Fe_2O_3	SiO_2	Ni	Cr	Al_2O_3	TiO_2
Plan factoriel	<u>1-2</u>	<u>1-5</u>	<u>1-4</u>	<u>1-4</u>	<u>2-1</u>	<u>2-1</u>
	Mn	MgO	Cu	CaO	V	
	<u>2-4</u>	<u>3-1</u>	<u>3-5</u>	<u>3-1</u>	<u>4-1</u>	

Les diagrammes utilisant les axes 1, 2 et 3 permettent de représenter les principaux phénomènes ; l'axe 4 n'intervient que pour le vanadium (partiellement discriminé) et le facteur 5 que pour le cuivre.

Projection des variables sur les plans des facteurs

Plan des facteurs 1 et 2 (Fig. 85)

Le pôle minerai est défini sur l'axe 1 ; il regroupe Fe, Ni et Cr et s'oppose globalement aux pôles silicaté, calcique et magnésien. C'est la meilleure projection pour caractériser le minerai. Le pôle alumineux (Al-Ti) est orthogonal au précédent.

Plan des facteurs 1 et 3 (Fig. 86)

Nous retrouvons sur ce diagramme l'opposition entre la silice et la magnétite décrite sur le plan précédent.

Une partie du vanadium semble liée aux silicates non magnésiens.

Le regroupement Mg-Cu est problématique car le cuivre n'est incorporé dans les silicates qu'en cas de déficit important en soufre. Dans cette hypothèse, Cu^{++} peut se substituer à Mg^{++} ou Fe^{++} mais ce phénomène est rare. Il paraît plus vraisemblable que les sulfures se localisent préférentiellement dans l'encaissant et sont absents dans le minerai.

Le manganèse est étroitement associé au pôle chlorite.

La calcite est discriminée et n'est associée à aucune autre variable.

Plan des facteurs 2 et 3

Ce diagramme n'apporte rien de nouveau et confirme l'étroite association du manganèse avec l'aluminium et le titane.

2.3.2.2.4.3. Bilan de l'analyse Em

Le minerai des gisements de la zone de Zermatt-Saas-Fee se caractérise par son enrichissement en nickel et en chrome.

Ces deux éléments sont exclusivement associés à la magnétite.

L'encaissant associe deux types de silicates : 1) les serpentines (pôle magnésien) ; 2) le second correspond probablement aux reliques, recristallisées ou non, de pyroxènes ou olivines, observées aux abords des gisements (Garciaz, 1979). Ces minéraux contiennent une partie du vanadium.

Ce dernier est absent de la magnétite.

Les échantillons chloriteux se caractérisent par une association Al_2O_3 - TiO_2 - Mn.

2.3.2.2.5. Conclusions à l'étude géochimique des gisements de la zone de Zermatt-Saas-Fee.

Nous n'observons pas dans ces gisements le phénomène constaté à Cogne, à savoir la constance du chimisme de la magnétite dans l'encaissant et le minerai : les magnétites accessoires sont caractérisées par l'association Fe, V, Co, les concentrations par Fe, Cr, Ni.

Le fer ne s'exprime pas entièrement sous forme d'oxyde dans l'encaissant ; une partie est liée aux serpentines. Ce fait détermine le comportement ubiquiste du cobalt.

Mn n'est pas associé à la magnétite, contrairement à ce qui se passe à Cogne, mais plutôt aux chlorites et aux minéraux titanifères (titanoclinohumite, sphène). Les implications génétiques de ces observations seront discutées ci-après.

2.3.3. Comparaison entre les gisements de la zone de Zermatt-Saas-Fee et de la zone du Combin

2.3.3.1. Données pétrographiques

En préambule à ce chapitre, il est nécessaire de rappeler les caractères pétrographiques des serpentinites des deux zones. Ces constatations sont empruntées à J.L. Garciaz (1979).

2.3.3.1.1. Caractères communs

La magnétite est toujours associée aux minéraux du groupe des serpentines (antigorite, chrysotile).

On constate la présence systématique de minéraux fémiques (olivines, pyroxènes) à proximité des gisements de magnétite.

Le degré de déformation des roches est très poussé au niveau des gisements.

2.3.3.1.2. Différences

Les différences observées sont d'ordre minéralogique, pétrographique et textural.

Dans l'unité du Combin, les paragenèses métamorphiques (olivines, humites) sont fréquentes. Elles sont très rares dans la zone de Zermatt-Saas-Fee.

La serpentinitisation est plus complète et plus homogène dans l'unité orientale dans la zone du Combin.

La magnétite se dispose souvent en lits fins, parallèles à la schistosité dans la zone de Zermatt-Saas-Fee ; la magnétite de Cogne est massive, à texture très fine, non orientée.

2.3.3.2. Données magnétiques

Les aimantations des serpentinites de la zone de Zermatt-Saas-Fee sont de trois à dix fois plus élevées, à teneurs égales, que celles des échantillons de l'unité du Combin (J. Pocachard, 1980, Fig. 87). Cette différence, résultant surtout de la variation de la fraction rémanente, est liée à la texture de la magnétite (litée dans l'unité de Zermatt-Saas, sans linéation dans la zone du Combin).

Ces données confirment le rôle de la tectonique dans l'agencement de la magnétite des gisements de la zone de Zermatt-Saas-Fee.

2.3.3.3. Aimantations spécifiques à saturation

Cette analyse, effectuée par P. Mollard* en collaboration avec J. Pocachard, concerne 20 échantillons (10 pour chaque zone) dont les teneurs en fer total s'échelonnent de 3,9 à 87 % dans la zone du Combin, à 7,9 à 56,6 % dans la zone de Zermatt-Saas-Fee.

Le principe consiste à placer l'échantillon dans un champ magnétique continu très intense qui provoque l'orientation de tous les moments magnétiques selon la direction du champ appliqué. La mesure de l'aimantation rapportée à l'unité de masse ne tient compte que de la nature du matériau.

Les résultats obtenus montrent une corrélation parfaite entre la teneur en Fe_2O_3 et la valeur de l'aimantation (les coefficients de corrélation sont de + 0,997 (zone du Combin) et de + 0,988 pour la zone de Zermatt-Saas-Fee (Fig. 88).

Nous pouvons conclure que le fer est exprimé sous la forme de magnétite. Toutefois une différence apparaît dans les deux courbes : l'origine des courbes se situe respectivement à 3 % de Fe_2O_3 pour les échantillons de Cogne et à 7 % pour les échantillons de la zone de Zermatt-Saas-Fee.

* Laboratoire de magnétisme Louis Néel (C.N.R.S. Grenoble).

Cette constatation souligne un fait signalé dans l'étude géochimique des serpentinites (analyse Es), à savoir qu'une partie du fer ne se trouve pas là sous forme de magnétite dans les serpentinites de l'unité de Zermatt-Saas-Fee.

2.3.3.4. Spectroscopie Mössbauer (Tableau 7)

Deux échantillons de minerai représentatifs des zones du Combin (mine de Cogne) et de Zermatt-Saas-Fee (gisement du Lac Gelé), ont été analysés par J.R. Regnard au laboratoire d'Interactions Hyperfines (D.R.F., C.E.N. Grenoble). Les deux spectres obtenus à 300°K sont identiques (Fig.89) et correspondent au spectre de la magnétite (Fig. 90 et 91) à l'exception de la raie à 0 mm/s. Cette anomalie ne peut être expliquée sans analyse complémentaire. Cependant il est intéressant de noter l'analogie des deux courbes avec les spectres obtenus par Y.E. Krupyanski et I.P. Suzdalev (1974) sur des échantillons de grains Fe_3O_4 de plusieurs dimensions. En particulier, nous constatons que la raie à 0 mm/s n'existe pas pour toutes les tailles. Nos deux spectres se rapprochent du spectre obtenu pour une taille moyenne de grain : $\langle d \rangle = 2\ 200 \text{ \AA}$.

Actuellement, cette étude est le seul support permettant d'expliquer l'anomalie à 0 mm/s. Mais par ailleurs, elle attire la controverse car la détermination de la taille des grains se fait communément par une série de spectres à température variable (Nordemann et al. 1979). Quoi qu'il en soit, l'analyse par spectrométrie Mössbauer permet d'arriver aux deux conclusions suivantes :

- l'oxyde est déterminé comme étant de la magnétite.
- il y a similitude presque parfaite entre les deux spectres, chacun étant représentatif d'une zone.

2.3.3.5. Données fournies par les sections polies

Six échantillons frais provenant de quatre niveaux (2214, 2227, 2249, 2256) de la mine de Cogne ont été étudiés. Quatre d'entre eux ne comportent que de la magnétite qui se présente sous la forme de globules (0,1 à 1 mm) cataclasés parfois sub automorphes. Les deux autres échantillons associent la magnétite, la pyrrhotite et la pyrite.

L'échantillon 2227 MC 2 montre une telle association et l'on peut définir l'ordre de cristallisation : magnétite, pyrrhotite, pyrite.

Dans la magnétite, nous observons (photo 9) de petites inclusions qui polarisent très fortement. En immersion (X800), il apparaît que ce sont des inclusions de pyrrhotite avec exsolution de pentlandite.

La section polie provenant de la mine du Lac Gelé (zone de Zermatt-Saas-Fee) possède une paragenèse plus complexe : magnétite contenant des résidus de pentlandite transformée en bravoïte (altération supergène) pyrrhotite altérée, fantômes de spinelles chromifères dans la magnétite (Photo 2). La structure ne permet pas de préciser l'ordre de cristallisation de ces différentes phases mais souligne l'effet important du métamorphisme (P. Picot, communication orale).

2.3.3.6. Données géochimiques

- Diagramme MgO/Fe_2O_3 - Ni/Cr (Fig. 92)

Ce diagramme rectangulaire permettant de visualiser les serpentinites et les minerais (rapport MgO/Fe_2O_3) et le degré de différenciation (rapport Ni/Cr) montrent deux phénomènes importants :

- . la constance du chimisme des serpentinites;
- . la différence existant entre les minerais des deux zones.

Toutes les serpentinites se regroupent dans un nuage de points peu étendu limité par les valeurs 2,5 et 8 pour MgO/Fe_2O_3 et les valeurs 0,3 et 1 pour Ni/Cr . Par contre, les serpentinites minéralisées ($MgO/Fe_2O_3 < 2$) se situent dans deux domaines :

- . dans un couloir limité par des valeurs de Ni/Cr comprises entre 0,3 et 5 pour les échantillons de la zone du Combin,
- . dans un domaine où Ni/Cr est inférieur à 0,25 pour les serpentinites minéralisées de la zone de Zermatt-Saas-Fee.

Nous pouvons, en outre, apercevoir une tendance des points figuratifs des échantillons de la zone de Zermatt-Saas-Fee, à se situer sur une droite d'inclinaison $\frac{MgO/Fe_2O_3}{Ni/Cr} = 6,6$

Ce phénomène pourrait témoigner de degrés différents de serpentinitisation. Cette tendance évolutive, observée dans les minéralisations de la zone de Zermatt-Saas-Fee, montre l'importance de la serpentinitisation dans la genèse des concentrations de magnétite de ce secteur.

Le gisement de Cogne, à l'inverse, ne peut pas être considéré comme le résultat ultime du processus qui a donné naissance à ceux de la zone de Zermatt-Saas-Fee.

2.3.3.7. Analyses en composantes principales

Projection des variables et des échantillons sur le plan des facteurs 1 et 2 (Fig. 157).

Le regroupement des deux populations, étudiées séparément lors de l'analyse statistique permet, par la projection des variables et des individus, de confirmer les observations résultant de l'étude du diagramme précédent. Les serpentinites des deux zones de regroupent dans un nuage délimité par les pôles Ni-Cr et Mg-Si. Ce nuage est déformé du fait de la présence d'échantillons enrichis en chlorite, calcite ou minéraux titanifères.

Le nuage des magnétites de Cogne est défini par les pôles Fe, Co et Mn. Ce nuage s'oppose à celui des serpentinites, soulignant ainsi les différences géochimiques existant dans les serpentinites et les minerais de Cogne.

Les minerais de la zone de Zermatt-Saas-Fee se situe dans un nuage allongé selon l'axe 2 vers le pôle chlorite (Al, Ca et Ti) ce qui s'explique par l'importance de la tectonique dans les minéralisations.

2.3.3.8. Caractères géochimiques des serpentinites et des magnétites dans les deux zones

- Les serpentinites

Elles se révèlent identiques, d'un point de vue géochimique, pour de nombreux caractères :

- . les éléments majeurs présentent des abondances et des dispersions très comparables entre les deux zones ;
- . les serpentinites (antigorite et chrysotile) se caractérisent par leur richesse en chrome et en nickel ;
- . la présence de calcite ;
- . la rareté et l'indépendance des sulfures ;
- . l'association entre les chlorites et les minéraux titanifères (les minéraux titanifères se développent dans les zones à chlorites; J.L. Garciaz, 1979).

Les différences observées concernent :

- . le fer : il est exprimé sous la forme de magnétite à Cogne, dans la zone Zermatt-Saas-Fee, il se partage entre les serpentines et la magnétite (paragraphe 2.3.2.2.2.3.) ;

. le chimisme des magnétites (considérées en tant que minéraux accessoires) : riches en manganèse et en cobalt dans les serpentinites de Cogne, riches en nickel et en chrome dans la région Est

- Les minerais de magnétite

Les minerais de Cogne se distinguent de ceux des indices de la zone de Zermatt-Saas-Fee par leur richesse en cobalt et en manganèse. Les minerais de la zone de Zermatt-Saas-Fee sont fortement enrichis en nickel et en chrome. Toutefois, l'enrichissement est plus important en chrome qu'en nickel, d'où la variation constatée pour le rapport Ni/Cr (paragraphe 2.2.3.6.). Ce phénomène est d'ailleurs vérifié par les résultats d'analyse sur un minerai séparé magnétiquement:

Echantillon	Ni ppm	Cr ppm	Co ppm	Ni/Cr
LG5	3280	13500	184	0,24

A titre de comparaison, l'analyse de la magnétite de Cogne indique :

Echantillon	Ni ppm	Cr ppm	Co ppm	Ni/Cr
2227 MC 5	386	590	273	0,66

2.3.4. Conclusions

La magnétite est classiquement considérée comme un sous produit inévitable de la serpentinitisation. Ces réactions mises en cause sont essentiellement des réactions d'hydratation et les études récentes concernant la source des fluides responsables de la serpentinitisation montrent que ce processus est continu, aussi longtemps que de l'eau océanique, météorique ou métamorphique est disponible (Coleman 1977).

Ce phénomène prend place le plus généralement dans un domaine de température de 100 à 300 °C ; les serpentinites à antigorite pouvant représenter des températures supérieures (jusqu'à 550°C dans le cas d'un métamorphisme régional de haut degré).

que le chimisme du minerai, permettent de supposer que la formation de la magnétite dans le zone de Zermatt-Saas-Fee a pris place lors des phases de métamorphisme : la tectonique jouant un rôle important dans l'agencement de la magnétite et dans la géométrie des gisements.

Ce modèle, satisfaisant pour les concentrations de la zone de Zermatt-Saas-Fee, ne peut guère s'envisager pour le gisement de Cogne pour les raisons suivantes :

- le chimisme et la pureté du minerai (absence de nickel et de chrome, richesse en cobalt). Ces caractères ne s'accordent pas avec une origine métamorphique ;
- l'importance du gisement : le calcul de la teneur moyenne en fer de la lentille de serpentinite de Cogne donne une valeur moyenne supérieure à 20 %. Il est exclu que la concentration en magnétite s'explique par un appauvrissement des serpentinites encaissantes ; celles-ci présentant des teneurs en Fe_2O_3 comparables à celles des autres massifs de la région (7 %).

Ces deux constatations nous amènent à supposer une origine prémétamorphique à partir d'un matériel préalablement enrichi en fer. Sous quelle forme se présenterait ce fer (par exemple, anciens dépôts hydrothermaux strati-formes de sulfure), il est difficile de le préciser. Le gisement de Cogne pourrait dans cette hypothèse résulter d'un processus magmatique proche de celui proposé par J.S. Dickey (1975) pour la formation des gisements de chromite. Cet auteur propose un processus analogue au procédé industriel utilisé pour purifier les métaux :

- le matériau impur passe à travers une zone où règne les conditions d'une fusion partielle. Les constituants de basse fusion sont retenus dans cette zone tandis que le matériau passant au-delà de la zone est enrichi en constituants réfractaires.

Ces aspects fondamentaux ne doivent pas faire oublier les conséquences relatives à l'existence d'autres gisements de la taille de Cogne (ce dernier est localisé uniquement dans la zone du Combin). Les recherches antérieures (Garciaz 1979, Pocachard 1980) n'ont pas abouti à la découverte de concentrations économiquement intéressantes. Les résultats de notre étude semblent confirmer le caractère exceptionnel du gisement de Cogne sans toutefois exclure l'existence de telles accumulations dans des conditions géologiques de même caractère.

2.4. ETUDES GEOLOGIQUES, GEOPHYSIQUES ET GEOCHIMIQUES SUR LE GISEMENT D'HERIN - CHAMPDEPRAZ (Fe-Cu)

2.4.1. Situation géographique

Coordonnées géographiques (carte Châtillon 1/25 000 , Fig. 36)

X = 393,7

Y = 5061,2

Z = 1 600 m.

Située à environ 2,5 km au NW de Champdepraz, l'ancienne mine d'Hérin était accessible, à l'époque de nos travaux (1980), par la route jusqu'à l'altitude de 780 m et ensuite à pied par le chemin de Crestaz. Ce dernier fait actuellement l'objet de travaux qui permettront l'accès en voiture jusqu'à Hérin.

2.4.2. Historique de la mine - Travaux miniers

Les premiers documents (Jervis 1873, Barreti 1893) témoignent de travaux remontant à l'Antiquité. Pendant le XXe siècle, la mine, exploitée en premier lieu pour le cuivre, fut ensuite, du fait de la diminution de la teneur en cuivre, exploitée pour le soufre. L'exploitation fut la plus intense durant les années 1940. A titre indicatif, la production mensuelle en 1942 fut de 188 t de pyrite à 3,5 % de cuivre (bibliographie : office minier de Turin).

Les réserves estimées en 1948 étaient de :

- 29 000 t (certaines) ;
- 50 000 t (probables), avec une teneur moyenne en cuivre de 2,5 % et en soufre de 20 à 25 %.

Travaux miniers

L'exploitation s'effectuait sur cinq niveaux échelonnés de 1 610 à 1 669 m d'altitude. L'extension des travaux souterrains est d'environ 700 x 150 m. Actuellement, seul le niveau inférieur, noyé, n'est pas observable. Les entrées principales sont situées à la côte 1 670 m au NE des installations minières (Fig. 93a et 93b).

2.4.3. Contexte géologique

Le gisement pyrito-cuprifère d'Hérin se situe dans une séquence hétérogène volcano-sédimentaire qui constitue la couverture du massif de serpentinites du Mont Avic (zone de Zermatt-Saas). Cette séquence est constituée de calc-schistes plus ou moins quartzeux, de chloritoschistes grenatifères, d'amphibolites à grenat et/ou glaucophane et de quartzites parfois grenatifères. Le gisement est de type stratiforme lenticulaire et se localise au contact des micaschistes et de l'ensemble amphibolites-chloritoschistes grenatifères.

Interprété comme le résultat de phénomènes d'exhalaison volcanique (Brigo, Dal Piaz, Ferrario, 1976), la minéralisation, mise en place au début de la sédimentation mésozoïque a subi les effets du métamorphisme et de la tectonique d'âge alpin.

2.4.4. Géométrie du gisement

La minéralisation se situe au contact des micaschistes et des amphibolites grenatifères et se compose d'un ensemble de lentilles d'une puissance variant de 0,2 à plusieurs mètres. L'extension est de 700 m (E-W) x 150 m (N-S). Le gisement, de type stratiforme, lenticulaire, est orienté E-W, avec un pendage variable (20 à 45°) vers le sud. L'horizon minéralisé est affecté par un plissement d'axe E-W qui donne à la structure une forme en S très prononcée dans la partie ouest du gisement (Fig. 93b). Des plis de même direction, d'amplitude métrique à décimétrique, provoquent localement des surépaisseurs d'origine tectonique.

2.4.5. Caractères pétrographiques

2.4.5.1. Les métasédiments

Le faciès le plus répandu est un micaschiste plus ou moins riche en calcite. Les lits quartzeux alternent avec des lits très fins de micas (Photo 10). On peut noter localement des bosselures dues à des grenats de la série pyrope-almandin. Les variations de faciès résultent de la présence relative des trois minéraux principaux (calcite, mica et quartz).

Un niveau proprement quartzitique existe au contact entre les chloritoschistes et les amphibolites. Ce niveau est généralement minéralisé en sulfures, le quartz formant la gangue du minerai.

2.4.5.2. Les faciès basiques

2.4.5.2.1. Les glaucophanites

De teinte vert sombre, elles sont très compactes et contiennent en proportion variable des grenats rouges, du glaucophane et de la chlorite. L'abondance de ce dernier minéral est très variable et permet le passage aux chloritoschistes à grenats.

2.4.5.2.2. Les chloritoschistes

Ils sont généralement grenatifères (petits cristaux plurimillimétriques de teinte rose à rouge) et contiennent des plagioclases albitiques et des amphiboles (hornblende ou actinote). Les faciès les plus albitiques correspondent aux prasinites plus ou moins amphiboliques.

2.4.6. Minéralisation

Il existe deux types de minéralisations :

- essentiellement cuprifère dans la zone Est du gisement ;
- pyriteuse dans la zone Ouest.

La chalcopryrite massive se présente sous la forme d'un "filon-couche" orienté E-W interstratifié dans les chloritoschistes à grenats. L'épaisseur réduite du "filon" est de 20 cm (Bibliographie : Office Minier de Turin). De la chalcopryrite apparaît aussi en imprégnations dans les chloritoschistes (3 à 7 % Cu).

La pyrite massive se présente en globules arrondis subautomorphes dont la taille varie de 1 à 5 mm. Elle contient en moyenne 2,5 % de cuivre. La chalcopryrite, limitée à la zone Est du gisement, est soit massive, soit en imprégnations dans les chloritoschistes. L'association entre les deux minerais est étroite et l'on observe des faciès intermédiaires où la chalcopryrite cimente les globules de pyrite dont la taille diminue en fonction de l'abondance en chalcopryrite.

Etude des sections polies

Echantillon H 3

Il présente une paragenèse complexe : chalcopryrite, pyrite, blende, magnétite, rutile, titanomagnétite, hématite, bornite, molybdénite.

Le pyrite est le minéral le plus abondant et se présente sous la forme de globules arrondis cimentés par la chalcopryrite. La blende est rare.

L'ordre de cristallisation entre ces trois minéraux est :

pyrite - blende - chalcopryrite.

La magnétite se présente :

- en bordure de la chalcopryrite ;
- en association avec le rutil et l'hématite.

Cette association pourrait résulter d'une déstabilisation sous l'effet du métamorphisme d'anciennes titanomagnétites. L'hématite résulte de l'oxydation de la magnétite. La bornite est associée à la chalcopryrite.

L'hématite lamellaire est fréquente. La molybdénite, en cristaux très petits, est rarissime.

Echantillon H 22

La pyrite et la chalcopryrite présentent les mêmes caractères que dans l'échantillon précédent. De la linnaéite $(Co, Ni)_2(Co, Ni, Fe, Cu) S_4$, est présente, en association avec la pyrite (Photo 11). Les minéraux forment des plages de taille importante, ce qui souligne le degré élevé des phénomènes de recristallisation métamorphique.

Echantillon H 23

Il montre une association de minéraux titanifères (sphène, ilménite, rutil) de la gangue de la minéralisation. Le sphène est inclus dans les paillettes d'ilménite qui se trouvent dans le rutil. Ce dernier forme de grandes plages et contient des cristaux de magnétite automorphes.

2.4.7. Caractères géochimiques du gisement

Nous n'avons pas procédé sur ce gisement à un échantillonnage aussi important que celui de la mine de Cogne. Douze échantillons, également partagés entre le minerai et l'encaissant, ont été analysés. Les oxydes et éléments dosés sont les suivants :

- Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO, MgO, TiO_2 , MnO, Na_2O , K_2O , P_2O_5 ,
- Sr, Th, Zr, V, Zn, Mo, Ag, Be, Cd, Cr, Co, Cu, Pb, Ni.

Les techniques d'analyse statistique multivariante ne sont pas utilisables sur une population aussi réduite. Nous essayerons de définir les caractères géochimiques du gisement à l'aide des études mono- et bi-variables de la composition chimique. Les lames minces et les sections polies observées servent de support à ce travail.

2.4.7.1. Les éléments majeurs et mineurs

Les teneurs en Fe_2O_3 permettent de distinguer les échantillons minéralisés. Elles s'échelonnent de 3,14 % à 73,5 %. Les teneurs les plus faibles correspondent aux micaschistes quartzeux et calcitiques, dans lesquels des sulfures disséminés n'ont pas été observés.

Par contre les chloritoschistes sont très nettement ferrifères, ($Fe_2O_3 > 15\%$). Les teneurs en cuivre, que nous considérons plus loin, confirment l'existence de minéralisations disséminées dans les chloritoschistes.

- CaO n'est présent à des teneurs importantes que dans les métasédiments (micaschistes quartzeux et calcitiques, calcschistes). Ces échantillons sont faiblement ferrifères (quelques %).
- Na_2O qui trahit la présence d'albite ou de glaucophane est concentré dans les faciès prasinitiques et glaucophaniques.
- MgO est dépendant de la présence de chlorite et présente en conséquence une distribution proche de celle de Al_2O_3 .
- K_2O est peu abondant (< 1 %). Les teneurs les plus élevées sont observées dans les métasédiments (liaison avec les micas).
- P_2O_5 : absent dans les échantillons minéralisés (teneur < 100 ppm), la teneur moyenne est de 600 ppm dans les roches encaissantes, témoignent de la présence d'apatite en quantité peu importante.
- TiO_2 : nous avons vu précédemment que les sections polies révèlent la richesse en minéraux titanifères (titano magnétite, sphène, ilménite, rutil) dont les associations sont le résultat des phénomènes de métamorphisme. Les teneurs en TiO_2 sont effectivement plus élevées (environ 1 %) dans les échantillons minéralisés.
- MnO : son abondance est identique (environ 1 000 ppm) dans l'encaissant et les roches minéralisées.

2.4.7.2. Les éléments en traces

- Be : présent à des teneurs très faibles (de 0,1 à 3,4 ppm).
- Cd : il est décelé (de 10 à 15 ppm) dans quelques échantillons minéralisés. La corrélation classique Zn-Cd est observée: Cd est lié à la blende en section polie.

- Sr : il est concentré dans les roches calciques (micaschistes, calc-schistes). Dans les autres faciès, les teneurs sont très inférieures (de l'ordre de la dizaine de ppm).
- Th : sa répartition est identique à celle de Sr ; la moyenne est de 20 ppm dans les métasédiments.
- Zr : la moyenne est de 10 ppm ; aucune distribution particulière n'apparaît.
- Mo : il est manifestement concentré dans les roches minéralisées (de 60 à 90 ppm). Les teneurs sont inférieures ou égales à 30 ppm dans les roches encaissantes. Le molybdène est exprimé sous la forme de minéraux indépendants (sans molybdénites automorphes) dans le minerai (cf. étude des sections polies, paragraphe 2.4.6).
- Ag : la limite de détection de la méthode analytique est de 5 ppm. Trois minerais sont enrichis : 7, 11 et 48 ppm. L'argent est classiquement associé au plomb ; ici, la galène n'est ni signalée dans la bibliographie, ni observée dans les sections polies. De plus, les échantillons argentifères sont totalement dépourvus de plomb (moins de 5 ppm). L'argent semble par contre corrélé au zinc.
- V : sa distribution est liée à celle du titane (la substitution $Ti^{4+} - V^{4+}$ est classique dans les minéraux titanifères). Il est en conséquence normal d'observer les valeurs les plus élevées dans les roches minéralisées. Une distinction peut être faite entre les roches enrichies en cuivre (qui contiennent beaucoup de titane et de vanadium) et les roches minéralisées riches en fer et dépourvues de cuivre, de titane et de vanadium. Il semble que les minéraux titanifères se localisent préférentiellement dans les zones à chalcopryrite et sont absents dans les zones à pyrite massive.
- Co : les sections polies révèlent la présence de linnaéite (formule moyenne $(CoNi)FeS_4$) associée à la chalcopryrite et à la pyrite. Le cobalt, le nickel et le cuivre semblent effectivement étroitement associés dans les minerais.
- Ni : les teneurs en nickel, à l'instar de celles en cobalt, augmentent en fonction de l'abondance en cuivre. Toutefois, des variations très fortes en fer n'influencent que très peu les teneurs en nickel. Ce dernier paraît associé préférentiellement à la chalcopryrite, à l'inverse du cobalt. Les valeurs du rapport Co/Ni, plus élevées dans les échantillons cuprifères, soulignent aussi cette tendance.

- Pb : cet élément est absent dans la majorité des échantillons. Il est décelé (10 ppm, 30 ppm, 30 ppm) dans trois échantillons de métasédiments et se trouve, en conséquence, corrélé au strontium et au thorium. La minéralisation en est totalement dépourvue.
- Cr : les teneurs en chrome varient peu. Il ne semble pas associé au minerai et se trouve déficitaire uniquement dans les métasédiments. Les autres roches présentent les teneurs habituelles des roches basiques.
- Cu : les teneurs s'échelonnent de 72,2 à 160 000 ppm (16 %). Il est curieux de noter que ces deux extrêmes représentent les deux échantillons les plus riches en fer. L'appauvrissement en cuivre dans la partie ouest du gisement, décrit dans la bibliographie, explique ce phénomène (la pyrite massive provient de la zone ouest du niveau 5). Les diverses roches encaissantes sont relativement riches en cuivre, témoin des sulfures disséminés dans celles-ci.
- Zn : les teneurs les plus élevées sont relevées dans les échantillons minéralisés. En section polie, la blende est observée. Le zinc semble corrélé avec l'argent et le cadmium.

2.4.8. Prospections effectuées

Sur le site d'Hérin, nous avons procédé à une campagne de prospection dont le but était double :

- étudier par polarisation spontanée et par magnétométrie les réponses du gisement ;
- rechercher par ces mêmes moyens les éventuels prolongements de la minéralisation.

La prospection géochimique par stream sediments s'ajoutait aux méthodes précédentes.

Les difficultés auxquelles nous nous sommes heurtés sont multiples :

- l'importance de la couverture forestière, associée à une topographie accidentée, ne permet pas une progression rapide ;
- la présence de terrains quaternaires épais (éboulis stabilisés ou vifs) compliquent la prise des mesures de polarisation spontanée ;
- la nature des éboulis, qui comportent en quantités importantes des blocs de serpentinites (fortement magnétiques), perturbe les mesures magnétiques et rend délicate l'interprétation des profils.

Les prises de mesures, magnétiques et électriques, ont été effectuées par deux équipes de deux personnes, se suivant à 10 m de distance. La première équipe procédait aux mesures de polarisation spontanée et au repérage topographique (méthode de la canette pour les distances, visée à la boussole pour l'orientation des profils). Le dernier point rencontrait des difficultés d'ordre physique (présence de roches très fortement magnétiques) et topographique (rareté des repères topographiques, impossibilité de viser des points éloignés dans les zones à forte végétation).

2.4.8.1. Prospections géophysiques

Les profils effectués sont repérés sur la figure

Ils se répartissent sur trois zones :

- à l'aplomb de la minéralisation ;
- à l'intérieur de la mine ;
- dans des secteurs éloignés de la zone minéralisée.

Parmi ces derniers, les profils les plus occidentaux étaient réalisés dans le but, pour la prospection magnétométrique, de rechercher des zones neutres pouvant servir de référence valable (absence de minéralisation et de serpentinites à magnétite).

2.4.8.1.1. Prospection magnétique

2.4.8.1.1.1. Profils de référence

Profil MH3 (Fig. 94).

Le profil entier est localisé sur des terrains de couverture (éboulis). La valeur de fond obtenue est d'environ 46 300 gammas.

Les profils MH8 et MH9 (non reproduits ici) présentent une valeur moyenne plus élevée (46 800 gammas) et une forme en dents de scie très prononcée. Les blocs de serpentinites, abondants dans les éboulis de ce secteur, sont responsables de ce phénomène.

Ces remarques s'appliquent aux profils MH1 et MH4, mais nous notons sur ceux-ci une valeur moyenne de 46 200 gammas. Il apparaît, en conséquence que les serpentinites, en proportion plus ou moins importante dans les éboulis, déterminent fortement la valeur du bruit de fond magnétique. Ce dernier peut être estimé à environ 46 300 gammas.

2.4.8.1.1.2. Profils effectués à l'aplomb de la minéralisation (profils MH2 et MH5, Fig. 95)

Les deux profils sont identiques. Ils se décomposent en deux parties, l'une très stable ($46\ 300 \pm 20$ gammas), la seconde très perturbée par des anomalies ponctuelles très "pointues" dont l'amplitude atteint plusieurs milliers de gammas. Ces anomalies, larges au maximum de 20 m, sont liées aux blocs superficiels de serpentinites riches en magnétite. Ces blocs sont absents dans la portion Nord du profil où les éboulis se composent de prasinites et d'amphibolites. La zone minéralisée se situe à la verticale de la limite entre les deux parties des profils.

Le profil MH2 ne montre pas d'anomalie visible due à une éventuelle minéralisation. Nous observons deux zones :

- l'une, perturbée, correspond aux serpentinites ;
- la seconde, très stable, correspond aux roches de la série volcano-sédimentaire (amphibolites, prasinites, chloritoschistes).

Le profil MH5 (Fig. 111) se divise ainsi en deux zones distinctes, mais la partie perturbée, située à l'aplomb de la zone minéralisée, peut se rattacher à celle-ci pour trois raisons :

- 1) l'anomalie est conforme à la position du profil par rapport à la minéralisation. Ceci en supposant que l'aimantation induite soit prépondérante par rapport à l'aimantation rémanente ;
- 2) l'anomalie semble locale, c'est-à-dire que la source est de dimension finie dans la direction du profil et celle perpendiculaire à celui-ci (voir MH2). La géométrie de la minéralisation (amas en chapelet) est conforme à l'anomalie observée ;
- 3) si on assimile la source magnétique à une sphère, en première approximation la distance source-captteur peut être estimée à 80 m (distance entre le minimum et le maximum). Cette profondeur, dont la valeur n'est qu'indicative, est en accord avec les données géologiques.

2.4.8.1.2. Prospection par polarisation spontanée

La nature de la minéralisation (sulfures) et sa forme (minerai massif en lentilles) représentent des conditions favorables pour l'emploi de cette méthode.

Le problème qui se posait était de savoir si, en dépit de la profondeur de la minéralisation (environ 50 m), cette méthode était susceptible de fournir des résultats.

Interprétation des profils

- Les profils réalisés en dehors des zones minéralisées ne montrent aucune anomalie. Ils permettent néanmoins de vérifier que le point de référence choisi était satisfaisant.
- Profil réalisé dans la mine.
Le profil PH7, effectué dans la galerie horizontale du niveau 5 de la mine, montre une succession d'anomalies négatives qui se corrèlent bien avec les lentilles minéralisées observées (Fig. 96). Globalement, le profil représente une anomalie de 350 mV dont l'extension est de 300 m. Les méthodes classiques d'interprétation ne sont pas applicables sur des profils réalisés dans la mine, les mesures n'étant pas représentatives uniquement des terrains sous-jacents.
- Profils réalisés à l'aplomb du gisement.
Profils PH2 (Fig. 97).
Les deux profils présentent une forme semblable, à savoir :
 - . une première partie caractérisée par une décroissance régulière des valeurs du potentiel ;
 - . une partie intermédiaire dans laquelle nous notons deux dépressions et deux remontées du potentiel ;
 - . une zone stabilisée à la valeur - 180 mV.

Le profil topographique correspondant permet d'interpréter les deux zones extrêmes du profil. La première partie correspond à une pente régulière ; la diminution du potentiel est liée au phénomène d'électro-filtration. D'après la valeur de la pente, l'électro-filtration peut être estimée à -0,5 mV par mètre d'élévation.

La progression s'étant effectuée en fin de profil en suivant les courbes de niveau, le profil est stabilisé.

La partie intermédiaire correspond à la zone minéralisée. L'extension de celle-ci, connue par galeries, est d'environ 200 m et se superpose à la seconde dépression. Cette anomalie, interprétée à l'aide des abaques de P. Gex (1977, double ligne de pôles inclinée) a pour paramètres (sur le profil PH5) :

$$L = 50^\circ$$

$$l = 10 \text{ m}$$

$$h = 50 \text{ m}$$

Ils sont en accord avec les données géologiques et montrent que la polarisation spontanée est utilisable pour la recherche de minéralisation de ce type.

2.4.8.2. Prospection géochimique par stream sediments

43 échantillons de stream sediments ont été prélevés et analysés sur le secteur de la mine d'Hérin (Fig. 93a). La maille de prélèvement est serrée, notre but étant de rechercher un éventuel prolongement de la minéralisation.

Les échantillons proviennent de trois secteurs :

- le secteur Est qui concerne les torrents drainant la zone minéralisée (14 échantillons) ;
- le secteur Ouest dans lequel aucun affleurement minéralisé n'est connu (19 échantillons) ;
- le secteur Sud-Ouest, qui permet l'extension de la prospection jusqu'au contact avec les serpentinites (10 échantillons).

Le nombre élevé d'échantillons et d'éléments analysés (20) a permis l'utilisation de méthodes statistiques multivariées (ACPN).

2.4.8.2.1. Variabilités géologiques classées par ordre croissant

Al ₂ O ₃	Na ₂ O	Mn	Sr	V	CaO	Be	Zr	MgO	K ₂ O	Cr	Th
0,12	0,18	0,18	0,18	0,18	0,21	0,23	0,25	0,35	0,39	0,45	0,48
Fe ₂ O ₃	Co	Ni	Zn	P ₂ O ₅	TiO ₂	Pb	Cu				
0,52	0,56	0,64	0,69	0,70	0,79	0,88	1,70				

Les 20 variables se répartissent en trois groupes :

- variabilité faible : Al, Na, Mn, Sr, V, Ca, Be, Zr, Mg, K, Cr, Th ;
- variabilité modérée: Fe, Co, Ni, Zn, P, Ti, Pb ;
- variabilité forte : Cu.

L'influence des échantillons provenant de la zone minéralisée est très forte. En effet, les éléments caractéristiques de la minéralisation (Fe, Co, Zn, Cu) et de la gangue (Ti, P) sont parmi les plus variants. Les éléments majeurs, les éléments en traces faiblement concentrés (Be, Zr, Th) ou caractéristiques des roches ultrabasiques (Cr) varient faiblement.

Il apparaît, en première approximation, que la distribution des éléments dans les stream-sédiments soit le reflet de celle observée dans les roches.

2.4.8.2.2. Analyse en composantes principales normées

2.4.8.2.2.1. Dendrogramme des corrélations positives (Tableau 8a et Fig. 98)

Les 20 variables se répartissent, au niveau 0,70 de corrélation, en quatre grappes et deux éléments indépendants.

La grappe ultrabasique formée par l'association Ni-Cr-Mg ne se rattache à aucun autre élément. Le contraste chimique entre les serpentinites et les autres roches présentes dans la zone prospectée est très fort pour ces trois éléments et apparaît très nettement sur la figure 99 qui représente la variation de la teneur en chrome dans les stream-sédiments en fonction de la distance avec les serpentinites.

La grappe minéralisation associe Co, Cu, Fe, V, P, Zn et Mn. Cette association est conforme à celles observées dans l'étude géochimique du gisement et dans l'étude des sections polies.

Le potassium et le thorium se rattache à la grappe minéralisation par l'intermédiaire de leurs corrélations avec le vanadium.

Zr et Be sont étroitement corrélés. Ces deux éléments sont présents, dans les roches et les stream-sédiments de la région d'Hérin, à de faibles teneurs. Ce groupe est rattaché à la grappe principale par la corrélation entre Be et K ; la valeur de celle-ci est significative de phénomènes complexes ou secondaires.

La quatrième grappe est constituée par l'association Ca-Sr-Al-Na qui reflète le chimisme des chloritoschistes et des prasinites (encaissant).

Les éléments indépendants sont le plomb et le titane.

2.4.8.2.2.2. Description des facteurs

Tableau des communautés des variables sur les cinq facteurs principaux.

Le tableau 8b montre que 8 variables (Na, Fe, Be, Co, Cu, Ni, V, Zn) sont décrites par un seul facteur. Parmi ces variables, nous notons la présence des éléments caractéristiques de la minéralisation (Fe, Co, Cu, Zn).

Facteur 1. Variance = 37,5 %

Il discrimine les éléments représentatifs de la minéralisation (Fe, Co, Cu, Zn, V) et les oppose à Ca et Cr.

Facteur 2. Variance = 21,6 %

Il oppose les pôles ultrabasique (Ni, Cr, Mg) et sodique. Il permet de représenter l'opposition entre les serpentinites et les amphibolites.

Facteur 3. Variance = 17,0 %

Une seule variable (Be) présente une communauté supérieure à 0,60. Be, auquel paraissent s'associer K, Ti, Pb et Zr, s'oppose à Sr, Al, Ca (pôle carbonates).

Facteur 4 et facteur 5

Les poids de variance de ces facteurs (6,0 % et 5,1 %) sont insuffisants pour pouvoir les interpréter. Seul le plomb est partiellement discriminé sur l'axe 5.

2.4.8.2.2.3. Projection sur les plans des facteurs

Le caractère particulier de l'échantillonnage, qui comporte des échantillons très enrichis en cuivre, ne permet pas de calculer, à l'aide de la méthode exposée dans la première partie de ce mémoire, les paramètres statistiques (teneur de fond et seuil d'anomalie) nécessaires à l'interprétation. En effet, les échantillons provenant du secteur Est de la zone prospectée possèdent des teneurs en cuivre, mais aussi en cobalt et zinc, très supérieures à celles des échantillons des autres secteurs. Il en résulte des seuils d'anomalie beaucoup trop élevés qui ne permettent aucune interprétation. L'exemple du cuivre est le plus flagrant : le seuil d'anomalie ($b + 2s$) est de 2 660 ppm si l'on considère la totalité de la population ; il est de 117 ppm après élimination des échantillons contaminés par la zone minéralisée. Le tableau ci-dessous présente les teneurs de fond et les seuils d'anomalies des éléments caractéristiques de la minéralisation (Cu, Co, Zn) :

Élément	b	b + 2s
Cu	127 (53)	2 663 (117)
Co	41 (33,5)	110 (58)
Zn	71 (50)	237 (94)

Toutes les valeurs sont en ppm. Les chiffres entre parenthèses indiquent les valeurs recalculées après élimination des échantillons contaminés. L'un des intérêts de l'analyse en composantes principales normées est de pouvoir projeter sur un même diagramme les variables (éléments) et les individus (échantillons). A noter que les composantes des variables et des individus sur un axe ne sont pas comparables en valeur absolue, seules les directions de projection sont conservées.

Cette représentation, qui permet de caractériser les échantillons sous la forme de nuages représentatifs, est utilisée dans cette étude dans le but de sélectionner les échantillons anormaux.

Projection sur le plan des facteurs 1 et 2 (Fig. 100)

Les cinq pôles de différenciation sont les suivants :

- le pôle minéralisation qui regroupe Co, Fe, Cu, Mn, Zn ;
- le pôle potassique constitué par l'ensemble K, Th, P, V ;
- le pôle calcique qui réunit Ca et Zr ;
- le pôle ultrabasique caractérisé par l'association Mg, Ni, Cr ;

- le pôle alumino-sodique qui associe Na, Al, Ti, Sr, Pb.

Nous avons défini précédemment trois secteurs de prospection dont les nuages représentatifs sont délimités sur la figure 116. Les échantillons du secteur Est se regroupent dans un nuage limité par les pôles de différenciation des carbonates (Ca, Zr) et des amphibolites-chloritoschistes (pôle alumino-sodique).

Le nuage englobant les échantillons du secteur Ouest s'étire depuis le pôle minéralisation jusqu'au pôle amphibolite. Cet allongement est le résultat de la variation des teneurs en cuivre qui implique pour les échantillons les plus pauvres de se situer près du pôle amphibolite du nuage précédent. Il est probable que le passage entre ces deux populations est continu. La troisième population, qui regroupe les échantillons du secteur sud ouest, est moins homogène que les précédentes. La majorité des échantillons se situe près du pôle de différenciation ultrabasique. Il faut voir dans ce phénomène le résultat de la proximité de ces échantillons avec les serpentinites.

Plus intéressantes apparaissent les positions de deux échantillons provenant de ce secteur qui se localisent près du pôle minéralisation. Les teneurs en cuivre, cobalt et zinc sont anormales pour l'un des échantillons qui contient respectivement 174, 55 et 113 ppm. Les valeurs en cuivre, cobalt et zinc sont de 100, 50 et 91 ppm pour le second échantillon.

La présence de valeurs anormales en cuivre, zinc et cobalt, associée aux caractères géochimiques de ces échantillons identiques à ceux provenant de la zone minéralisée est l'indication certaine de l'existence d'une minéralisation dans ce secteur. Parmi les échantillons du secteur Est, ceux du torrent Pialon ne sont pas en aval de la zone minéralisée exploitée. Néanmoins, ils se regroupent sur la projection avec les échantillons riches en cuivre et les teneurs relevées pour cet élément sont de 479 et 212 ppm pour les deux échantillons situés le plus haut dans le vallon. La possibilité de prolongement de la zone minéralisée vers le nord est, en conséquence, à envisager.

Plan des facteurs 1 et 3 (Fig. 101)

Le pôle minéralisation est identique à celui défini sur la projection précédente. Toutefois, les communautés cumulées sur les facteurs 1 et 3 sont, pour le cuivre et le cobalt, inférieures à celles obtenues sur les facteurs 1 et 2. En conséquence, la qualité de représentation des échantillons enrichis en cuivre est moins bonne, ce qui se traduit par une augmentation

importante de la surface du nuage représentatif de ces échantillons. Dans ce dernier, nous retrouvons les échantillons anomaux décrits précédemment, à savoir :

- les échantillons du Val Pialon,
- les deux échantillons du secteur Sud Ouest.

Les deux nuages représentatifs des échantillons des secteurs ouest et sud ouest se chevauchent et montrent un allongement parallèle à l'axe 3.

Plan des facteurs 2 et 3

Sur ce diagramme, 8 variables ne sont pas discriminées (communauté cumulée sur les deux facteurs inférieurs à 0,15). Parmi celles-ci, se trouvent les éléments caractéristiques de la minéralisation : Zn, Cu, Mn, V, Fe, Co.

Nous ne présentons pas ce diagramme qui n'apporte, du point de vue prospection, aucun élément intéressant.

2.4.9. Bilan des prospections effectuées sur le site d'Hérin

L'analyse factorielle a confirmé les caractères géochimiques déduits de l'étude des sections polies et des analyses chimiques de roches, à savoir que le gisement d'Hérin se caractérise par l'association Fe-Cu-Zn-Co et par l'absence de Pb.

En outre, deux zones présentent des caractères suggérant l'existence de minéralisations cachées. Ces deux secteurs, situés respectivement à l'ouest du village d'Hérin et dans le Val Pialon (Fig. 93a), mériteraient des études plus approfondies.

CHAPITRE III

ETUDE METALLOGENIQUE DE L'OUEST DU VAL D'AOSTE - GISEMENT DE PROMISE (VAL RUITOR)

3.1. INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à l'étude géologique et métallogénique de l'Ouest du Val d'Aoste limité au NW par le massif du Mont-Blanc et au SW par les massifs du Ruitor et de Flassin. Ce travail est un support indispensable à l'interprétation de la prospection à caractère régional (roches, stream sediments, batées). Nous nous attarderons sur le site minier de Promise (ancienne exploitation de blende et galène argentifère dans le Val Ruitor) où nous avons recherché les éventuels prolongements de la minéralisation par différentes méthodes géophysiques et géochimiques. Ce terrain d'étude est limité par la commune de La Thuile, le Mont des Terres Noires, le Mont Chaz-Duraz, le Mont Belvédère, le Val de Pontailles, le glacier du Ruitor, le Mont Colmet, le lac de Pierre Rouge et le lac d'Arpy (Fig. 102 et 103)

3.2. GEOLOGIE GENERALE

3.2.1. Les grandes unités structurales (Antoine, 1978)

Du NW au SE nous rencontrons successivement :

- le massif du Mont-Blanc, socle cristallin de la zone helvétique ;
- la zone helvétique au sens large, empilement de couches sédimentaires isoclinales très redressées ;
- la zone des brèches de Tarentaise (ou zone Valaisanne), constituée des principales unités de Ferret, de Roignais-Versoyen et des Cols, réduites à des lames isoclinales ou écaillés ;
- la zone briançonnaise, à caractère géanticlinal, subdivisée structuralement en trois zones : la zone externe peu ou pas métamorphique (La Thuile), la zone Rutor-Grand Saint-Bernard et la zone interne métamorphique ;
- la zone piémontaise ou zone des schistes lustrés.

3.2.2. Evolution orogénique

3.2.2.1. Orogénèse antéhercynienne

Elle est attribuée au Calédonien ; les formations anciennes sont affectées de transformations anatéxiques et d'une mylonitisation générale (massif du Mont-Blanc).

3.2.2.2. Orogénèse hercynienne

La mise en place du granite du Mont-Blanc est d'âge carbonifère (Westphalien) et la phase magmatique acide (filons de rhyolite et microgranite) est attribuée au Permien (zone briançonnaise).

3.2.2.3. Orogénèse alpine (Debelmas, 1974)

Le massif cristallin du Mont-Blanc est émergé de la fin de l'Hercynien au Tertiaire.

Grandes étapes de l'orogénèse alpine :

- Trias au Crétacé, phénomènes de distension (spilites du Versoyen) et formation des bassins sédimentaires (sédimentation de plate-forme puis dépôt péritique de la zone des brèches de Tarentaise).

- Crétacé supérieur au Pliocène, phénomènes de compression avec trois étapes du plissement alpin :

- . Crétacé supérieur-Eocène, plissement des zones des brèches de Tarentaise et ultrahelvétique ;
- . Oligocène et Miocène, plissement des zones internes, clivage en nappes (schistes lustrés) et métamorphisme plus ou moins régional et intense, puis mouvements verticaux ;
- . fin Miocène et Plio-Quaternaire, mouvements tangentiels ou verticaux qui affectent toute la chaîne.

3.2.3. Géologie du NW du Val d'Aoste (Antoine, 1978)

Du NW au SE, nous observons successivement :

3.2.3.1. Le socle cristallin

Le socle cristallin du massif du Mont-Blanc est représenté essentiellement par des gneiss, des micaschistes et des granites, traversés par des filons d'amphibolites et de pegmatites d'extension relativement restreinte.

3.2.3.2. Les zones helvétique et ultrahelvétique

Des calcaires, des calcschistes et des schistes marneux alternent sans coupure précise dans des niveaux décollés, écaillés et fortement laminés.

Le massif Mont Chétif - Mont de la Saxe, qui domine Courmayeur, est intégré dans les zones helvétique et ultrahelvétique. Le soubassement de ce massif est composé de granite (contemporain de celui du Mont-Blanc) et de microgranite porphyrique.

Les calcaires spathiques liasiques et les schistes aaléniens, transgressifs sur ce cristallin, contiennent la minéralisation fluoro-barytique du Trou des Romains (Val Sapin).

3.2.3.3. La zone des brèches de Tarentaise

Cette zone, à dominante calcaire, est essentiellement détritique, avec alternance de niveaux schisteux et gréseux.

Elle se subdivise principalement en deux formations : une formation basale des "Flyschs de Tarentaise" (dolomie triasique et calcaire liasique avec conglomérats) et les Flyschs de Tarentaise au sens strict (calcaires, calcschistes et schistes phylliteux), l'ensemble étant d'âge crétacé. Le contexte métallogénique de cette zone, est très mal connu.

3.2.3.4. La zone briançonnaise

Elle comporte trois ensembles structuraux : zone briançonnaise externe ou zone houillère axiale, zone Ruitor - Grand Saint-Bernard, zone briançonnaise interne, prolongement de la zone Vanoise - Mont-Pourri.

- Zone briançonnaise externe

Elle est constituée essentiellement de schistes et de grès. Elle renferme des niveaux productifs (charbon de La Thuile). Les schistes noirs à minces veines d'antracite alternent avec des grès arkosiques micacés et des lentilles de conglomérats polygéniques (galets de quartz et galets mous de schistes). Les centres éruptifs de la zone briançonnaise externe sont constitués de complexes magmatiques acides : dalles gneissiques peu replissées plongeant 40 à 70° au SSE, métagranite et prasinite intercalés en laccolite en position normale dans la zone briançonnaise externe schisto-gréseuse très tectonisée. Les anciens foyers magmatiques sont d'âge carbonifère supérieur et permien inférieur.

- Zone Ruitor - Grand-Saint-Bernard

Les orthogneiss granitiques et les micaschistes à deux micas constituent les séries métamorphiques antécarbonifères. Elles correspondent à un ancien paléorelief hercynien au niveau duquel affleurerait le socle anté-houiller.

- Zone briançonnaise interne

Les équivalences entre la zone Vanoise - Mont-Pourri s'observent essentiellement dans les micaschistes albitiques présumé carbonifère, charbonneux et pyriteux (Caby, 1968, 1974). L'activité volcanique (prasinites et ovarditites) apparaît beaucoup mieux dans la zone interne que dans la zone externe.

Les gneiss albitiques antécarbonifères et permo-triasiques ont un faciès polymétamorphique très poussé.

Les granodiorites à enclaves, plus rarement les granites et les microgranites, sont visibles dans le val de Cogne.

3.2.3.5. La zone piémontaise ou zone des schistes lustrés

Les calcschistes renferment des lentilles de prasinites et de serpentinites.

3.3. ETUDE DETAILLEE DE LA ZONE BRIANCONNAISE EXTERNE, AU SW DE LA DOIRE BALTEE (Fig.104 et 105)

Les formations antétriasiques de la zone briançonnaise externe sont caractérisées par une série essentiellement silico-alumineuse d'origine détritique. Les néoformations et les recristallisations minérales liées au métamorphisme oblitèrent légèrement les caractères primaires de la roche.

Les bancs d'antracite contiennent une riche flore fossile du Westphalien supérieur (col du Petit Saint-Bernard). La puissance globale de ces formations est très mal connue car la structure tectonique est complexe. Elle doit être de l'ordre de quelques milliers de mètres.

Nous ne parlerons pas dans ce mémoire de la couverture triasique de la zone briançonnaise, n'existant pas sur notre terrain d'étude.

3.3.1. Caractères lithologiques (Elter, 1965)

Les types de roches rencontrés dans la zone briançonnaise externe sont :

- les schistes sériciteux argileux riches en substances carbonées ;
- les schistes pélitiques graphiteux ;
- les grès micacés à grains fins ou moyens, plus ou moins feldspathiques ;
- les poudingues quartzeux à ciment gréseux ;
- les poudingues polygéniques à éléments de quartz, d'épidotes, de schistes et de gneiss albitiques ;
- l'antracite.

Sur le terrain, nous n'avons pas poussé aussi loin la différenciation des roches. Nous avons déterminé quatre unités : l'antracite, les schistes noirs, les grès micacés et les conglomérats. Néanmoins, nous avons mis en évidence une cinquième unité, très réduite (affleurement de l'ordre de quelques m²), représentée par des calcschistes (plateau Chaz-Duraz).

L'arrangement de ces unités est défini par l'alternance de différents types de schistes et de grès, avec des intercalations plus ou moins épaisses d'un ou des autres types lithologiques. Les intercalations constituées de bancs ou de lentilles d'antracite, caractérisent la partie de la série attribuable au Westphalien supérieur - Stéphanien inférieur (partie NW de notre terrain d'étude, Mont Belvédère, Mont Chaz-Duraz, les Terres Noires, la commune du Villaret).

Cette partie est constituée de schistes et de grès dans lesquels apparaissent intercalées deux formations successives anthracifères. Les deux formations productives sont corrélables à celles de la Tarentaise, que J. Fabre (1961) attribue au Westphalien C et D et au Stéphanien inférieur (Assise de Tarentaise). Les deux horizons sont individualisables au col du Petit Saint-Bernard. Plus au NE cette remarque ne peut plus être faite.

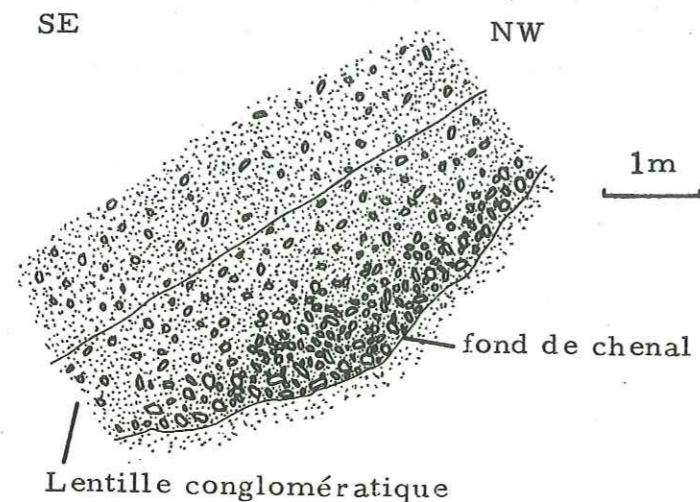
Les psammites feldspathiques, les schistes pélitiques et les intercalations conglomératiques caractérisent la partie de la série attribuable au Stéphanien (partie SE de notre terrain, Mont Pontailles, commune de la Joux, Mont Colmet, col de la Croix, lac d'Arpy). Il s'agit d'intercalations de puissance variable, de conglomérats à éléments polygéniques (éléments de quartz, de schistes noirs, de gneiss albitiques), associées à des arkoses et à des roches schisto-gréseuses. L'ensemble se caractérise par l'absence de substances carbonées et par une couleur gris verdâtre qui rappelle l'"Assise de Courchevel" en Tarentaise, attribué au Stéphanien. Entre ces deux parties, nous définissons une limite lithologique qui renferme la minéralisation de Promise. Ce repère lithologique, bien que flou et imprécis, est pris en considération au cours des prospections géochimique et géophysique, car il est le seul remarquable. Ce repère est situé au S Mont Belvédère, rejoint le torrent Ruitor vers la Joux, traverse diagonalement le versant droit du vallon Ruitor jusqu'au col de la Croix et descend vers la Doire Baltée en aval du pont de la Salle.

Remarque :

La puissance des intercalations conglomératiques est variable. Les variations latérales des faciès sont rapides. Les structures en chenaux sont nettes.

Nous avons défini une polarité dans les bancs conglomératiques (Fig.106).

Fig.106 : Granoclassement dans les bancs conglomératiques



Nous avons précisé la continuité des unités conglomératiques (Fig.105). L'allongement des affleurements des conglomérats est orienté N20° à N30° (Fig.104).

3.3.2. L'anthracite de La Thuile (Bulletin de la Société Cogne)

L'examen du gisement d'anthracite de La Thuile apporte des arguments sur la morphologie et les conditions de dépôt du bassin.

Le bassin anthracifère de La Thuile est un bassin limnique, intra-alpin, d'âge Westphalien supérieur à Stéphanien inférieur.

Le gisement est associé à un système tectonique apportant des modifications dans sa morphologie.

Sa puissance varie de quelques décimètres à quelques mètres. Le développement, en chapelets de lentilles, suit une ligne NE-SW de plusieurs kilomètres de long. L'extension selon le pendage SE n'est pas encore déterminée.

La continuité de la structure carbonneuse entre les lentilles aux dimensions décamétriques, est matérialisée par des faisceaux de schistes à anthracite dans lesquels abondent des filonnets de quartz. Les unités anthracifères se composent d'une superposition de chapelets plus ou moins parallèles.

A la concession de la Croix, les exploitants ont observé des écartements variables entre les unités carbonneuses. Dans les zones de rapprochement, les lentilles s'épaississent et se suivent en direction à courte distance, tandis que dans les zones d'éloignement, les exploitants ont noté des gisements de moindre importance et une distance plus grande entre les lentilles.

Il y a 12 unités recensées, qui se fondent en une seule dans les zones de rapprochement.

Le charbon a naturellement une certaine plasticité et une mobilité plus grande que son encaissant.

Les formes du gisement, en coupe NW-SE, sont associées à un système tectonique complexe (Fig. 107).

La figure 107 montre le plissement qui affecte le gisement sans pouvoir malheureusement indiquer l'orientation de l'axe des plis. Le phénomène de bourrage dans les charnières de pli concentre l'anthracite dans des poches. Les documents de la mine d'anthracite de La Thuile ne mentionnent pas la présence de faille. Les mouvements verticaux semblent inexistantes ou négligeables.

3.3.3. Aperçu structural de la zone briançonnaise externe

3.3.3.1. Cadre structural

Plusieurs phases tectoniques interfèrent entre elles et comportent un style structural de nappe de charriage et un style de tectonique cassante épirogénique.

Dans le secteur étudié (Chaz-Duraz, Val Ruitor et col de la Croix), nous distinguons succinctement :

- une stratification S_0 , soulignée par un feuilletage fin de micas blancs et de minéraux opaques (hématite) ;
- une schistosité S_1 et un plissement P_1 associée à la mise en place des grandes unités structurales. La schistosité S_1 est soulignée par un litage de micas blancs. La minéralisation de la mine de Promise met en évidence la phase S_1P_1 . Les plis P_1 , à charnière arrondie, sont de type isoclinal très fortement déversés vers le NW. La schistosité S_1 reprend la stratification S_0 pour créer des cannelures espacées de quelques millimètres. L'échelle des plis P_1 varie du centimètre au kilomètre ;
- une tectonique cassante, matérialisée par des fentes étroites verticales et minéralisées (quartz et albite). Le rejet des failles semble négligeable.

3.3.3.2. Interprétation photogéologique

L'examen des photographies aériennes met en évidence des lignes (Fig. 108) qui correspondent à l'intersection des plans structuraux (stratification, schistosité, faille) avec la surface topographique.

Méthode :

Nous avons relevé systématiquement toutes les lignes structurales remarquables en photographie aérienne. Sur chaque ligne nous avons noté sa direction par rapport au N et sa longueur.

Les lignes ont été distribuées par classes de 10 ou 15 degrés sur toute la surface représentée par la ligne. Dans chaque classe les longueurs sont cumulées. Nous obtenons les résultats sous formes de pourcentage qui traduisent une densité d'alignement selon les familles de direction.

Cette analyse a été faite sur des photographies, en couleur, de 23 cm x 23 cm, dont l'échelle approximative est 1/15 000.

Nous avons partagé la zone étudiée en deux secteurs, rive gauche et rive droite du torrent Ruitor (celui-ci coupe transversalement la zone briançonnaise externe et créé ainsi un "V" topographique).

Les directions principales qui apparaissent sont les suivantes :

Sous secteurs	10 à 20 %	20 %
Rive droite	N 30°	N90°
Rive gauche	N 60° N105°	N90°

Développement :

Les lignes N90° correspondent à la fracturation verticale définie dans le paragraphe 3.3.1.

Les lignes N30° en rive droite et N60° en rive gauche correspondent à la schistosité S_1 . Effectivement, l'orientation de S_1 (N45° 45° SE) distribue les lignes suivant deux familles.

Les lignes N105° sont associées aux fractures verticales N90°.

3.3.3.3. Résumé

Les grandes structures sont :

- S_0 N20 à 40°, pendage 65° vers le SE ;
- S_1 N45°, pendage 45° vers le SE ;
- P_1 N10°, pendage 20° vers le S ;
- fractures N90 à 100°, pendage subvertical.

3.3.4. Etude pétrographique ; le métamorphisme

Un métamorphisme de faciès "Schiste vert" affecte la zone briançonnaise externe (J. Bocquet, 1974). La température (300°C) et la pression (4 Kbars) effacent les faciès pétrographiques primaires des roches. L'âge présumé de ce métamorphisme est de 40 millions d'années.

La néoformation de séricite et de chlorite et les recristallisations de calcite et de quartz oblitèrent légèrement la structure primaire des roches et soulignent les structures secondaires (schistosités).

La paragenèse commune de la zone briançonnaise externe du secteur Chaz-Duraz - Promise est : quartz, phyllites, calcite, plagioclase et minéraux opaques.

3.3.4.1. Quartz

Il est présent dans toutes les roches étudiées sous forme détritique (50 à 80 % de la roche) et sous forme filonienne.

- Roches gréseuses et schisteuses

Elles sont formées essentiellement de quartz en gros et petits cristaux. Les petits cristaux constituent la matrice des roches, soulignant un litage fin séparé par des phyllites. Les gros grains (> 1 mm) sont noyés dans la matrice quartzreuse. Nous observons des extinctions onduleuses et des bandes d'extinction en lumière polarisée analysée (Photo 12)

- Roches conglomératiques

Les galets centimétriques de quartz des unités conglomératiques sont d'anciens grès métamorphisés dont le ciment à grains de quartz fin est recristallisé. Les reliques du litage sont encore visibles (conglomérats au S du Mont Chaz-Duraz).

- Quartzites

Le quartz de l'importante masse quartzreuse au pied du Mont Belvédère est caractérisé par un faciès de recristallisation plus poussé que dans les autres roches quartzreuses. Ce quartzite apparaît souvent sous l'aspect d'un "gneiss oillé" avec des amandes de quartz séparées par de fins litages de minéraux phylliteux qui marquent les microfissures.

- Le quartz des filons

Le quartz et les différentes cristallisations des fentes d'extension n'ont pas été étudiés.

3.3.4.2. Phyllites

La phengite et la muscovite sont les principaux minéraux phylliteux. Ils soulignent nettement les plans S_0 et S_1 présents dans toutes les roches (Photo 13)

Sous la texture de fines paillettes allongées, ces minéraux sont associés aux minéraux d'altération métamorphique : séricite, chlorite et épidote.

L'extinction onduleuse se remarque sur ces minéraux phylliteux.

3.3.4.3. Calcite

La calcite des bancs de calcschistes au pied du Mont Chaz-Duraz pose le problème de son origine. Parfois en gros grains (> 1 mm), probablement recristallisée, elle englobe les grains fins de quartz et de séricite. Elle n'a pas un aspect de ciment.

L'altération avancée de la roche et le litage S_0 marqué par les minéraux phylliteux ne nous permettent pas de penser que la calcite ait une origine secondaire de type imprégnation hydrothermale tardive. Malgré la restructuration métamorphique, nous retenons une origine détritique pour les calcschistes.

3.3.4.4. Plagioclase

Le plagioclase est représenté uniquement par l'oligoclase.

3.3.4.5. Minéraux opaques

L'hématite et la limonite, en petits grains groupés, sont souvent associées aux lits phylliteux.

Elles accompagnent fréquemment le graphite. Ce dernier cimente les gros grains de quartz dans les roches schisteuses et se localise dans les vides créés par l'intersection des plans S_0 et S_1 .

3.4. ETUDE METALLOGENIQUE DU GISEMENT DE PROMISE

3.4.1. Introduction

Le gisement de Promise se situe au Sud de la localité de La Thuile, sur la route menant au Col de Joux, en rive droite du torrent Ruitor, à l'altitude de 1 610 m. Les haldes, dégagées de toute végétation, se distinguent sur le versant Ouest du Mont Colmet (Fig.104 et 109).

L'exploitation minière, par salles et piliers a été axée sur l'extraction de la blende, de la galène et de la chalcopryrite (Fig.110).

3.4.2. Historique

Les principaux travaux s'échelonnent entre 1918 et 1934. La découverte de ce gisement est probablement antérieure à cette époque (1782 à 1809) mais les comptes-rendus miniers sont trop sommaires et incomplets pour le préciser.

Les rapports géologiques et miniers de l'Office des mines de Turin présentent ainsi le gisement : "Le gisement est constitué d'un filon quartzeux minéralisé en sulfure mixte, concordant avec les schistes du Carbonifère supérieur, orienté NE-SW avec une inclinaison SE variable de 30 à 45°. La puissance du filon varie de la simple trace à 2,80 m".

"L'étendue du gisement a été reconnue et suivie sur environ 245 m de longueur. La minéralisation est visible aux deux extrémités du NE au SW, dans le niveau de base Saint-Pierre à l'altitude de 1 578 m".

"Le minerai est représenté par un sulfure mixte ; par ordre décroissant d'importance : blende, galène, pyrite et traces de chalcopryrite. Les concentrations dans le tout-venant sont de 8 % de Zn et Pb dans lequel il y a 5 % de Zn". Les teneurs en argent ne sont pas indiquées mais sa présence est mentionnée. "L'extraction est de l'ordre de 150 tonnes de blende par mois dans les années 1933 et 1934".

Les rapports n'expliquent pas pourquoi cette exploitation n'a pas été poursuivie après ces années.

Le foudroyage des salles et des galeries ne nous a pas permis d'accéder au front de taille et de nous rendre compte de l'état de la structure minéralisée en fin d'exploitation mais quelques observations ont pu être effectuées sur des piliers.

3.4.3. Cadre régional

Globalement, nous pensons que la distribution des paragenèses minérales se superpose parfaitement aux différentes zones structurales et paléogéographiques des Alpes, marquée par leur chimisme particulier.

C'est dans la zone briançonnaise et plus précisément dans la zone externe ou zone houillère axiale que se trouvent de nombreux gisements plombo-zincifères : Isérables (Suisse) : filons de galène (Pb) dans une gangue de quartz, inclus dans des micaschistes prétriasiques.

Les Sarrazins (Maurienne) : filons couchés et filons failles de galène, de blende et de chalcopryrite dans une gangue de quartz et de sidérose, inclus dans les schistes et les phyllades permo-carbonifères.

La Plagne (Tarentaise) : amas stratiformes de chalcopryrite et de galène argentifère dans une gangue de quartz et de barytine, inclus dans les grès triasiques. Trois millions de tonnes de galène argentifère ont été extraits de cette mine (teneur de l'ordre de 3,5 % de Pb).

La mine de Promise (Val Ruitor) appartient à cette vaste province métallogénique.

Nous reviendrons dans le chapitre sur la prospection alluvionnaire de l'Ouest du Val d'Aoste sur la valeur métallogénique de cette zone (Chapitre II, 3ème partie).

3.4.4. Contexte géologique du gisement de Promise

La minéralisation de Promise est interstratifiée dans les unités des schistes et grès de la zone briançonnaise externe datée du Permo-carbonifère. Approximativement, nous la situons sur la limite floue des schistes noirs-grès et grès-conglomérats définie dans le paragraphe 3.3.1.

Cette limite constitue le repère stratigraphique majeur que nous avons utilisé dans notre recherche des prolongements du gisement de Promise.

3.4.5. Géométrie du gisement

La structure minéralisée, que nous pouvons suivre en surface entre les galeries Saint-Jacques et Saint-Maurice, est représentée par deux bancs minéralisés d'épaisseur décimétrique séparés par une lentille de conglomérats à galet de quartz. L'ensemble est interstratifié dans les schistes noirs particulièrement écrasés et feuilletés. La lentille conglomératique passe latéralement et rapidement aux schistes noirs (niveau Argentière).

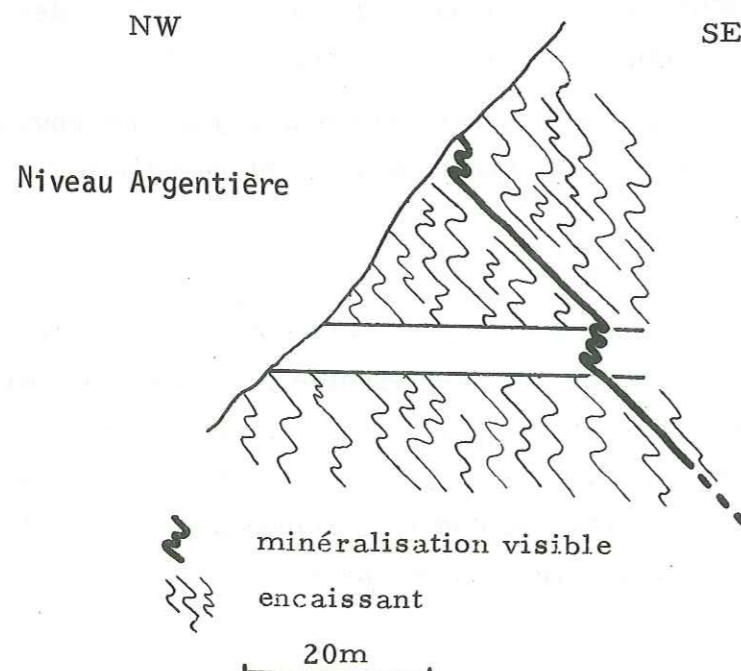
- Le banc supérieur, contenant les principales minéralisations sulfurées du gisement (blende, galène, chalcopryrite et pyrite, dans une gangue de quartz, sur 40 cm de puissance), plonge sous le Mont Colmet suivant un plan incliné de 45° vers le SE, orienté N 60 à 70°. Le banc supérieur semble continu et son épaisseur est variable. D'après les rapports géologiques, l'extension en pendage aval à partir de l'affleurement est de 245 m et l'extension en direction est de 300 à 400 m.
- Le banc inférieur, parallèle au précédent, minéralisé en pyrite disséminée dans le quartz sur une puissance de 20 cm, disparaît latéralement et rapidement, laissant la place aux schistes noirs.

Ces bancs parallèles à la stratigraphie S_0 , sont impliqués dans des phases de plissement qui épaississent la structure minéralisée.

A l'affleurement, la puissance des bancs minéralisés est de 20 à 40 cm. A 20 m et en pendage aval de l'affleurement, les piliers minéralisés des salles d'exploitation ont 2 à 3 m de hauteur. La phase de plissement P_1 est à l'origine de ces renflements (Fig.111).

L'extension globale, en direction N 40° de ce renflement est de l'ordre de la centaine de mètres et donne un aspect lenticulaire à la structure minéralisée. Selon le pendage de la minéralisation, nous avons observé successivement deux zones de plis (Fig. 112).

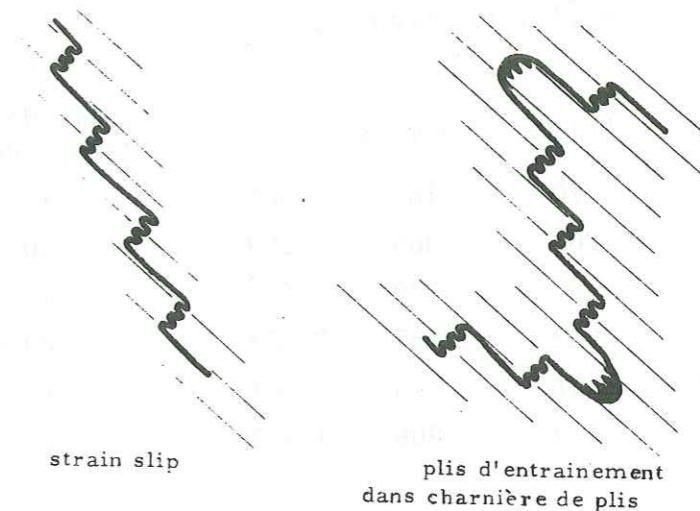
Fig. 112 - Zone de plis



Nous ne pouvons pas affirmer si ce phénomène est régulier, en se répétant tous les 20 m, ou si la minéralisation augmente de volume lorsqu'on s'introduit plus profondément dans la mine.

Mais nous pouvons imaginer dans ce type de déformation, diverses structures de la minéralisation en profondeur (Fig.113).

Fig.113 - Structures possibles de la minéralisation



Dans l'état actuel de nos connaissances structurales, nous ne pouvons pas résoudre ce problème.

Il existe, dans le paysage (Mont Colmet), des structures plissées d'amplitude kilométrique, associées à la phase S_1P_1 . Cette observation est fondée sur des observations panoramiques faites à partir du plateau Chaz-Duraz vers le Mont Colmet et le Mont-Ruitor.

3.4.6. Sections polies (Photo 14)

Les sections polies signalent une paragenèse dense : mispickel, pyrrhotite, blende, chalcopryrite, galène, cuivre gris et pyrite (par ordre de cristallisation apparent). Le graphite est en lamelles dans les sulfures. Rien ne laisse penser à une minéralisation de haute température (paragenèse très monotone sans inclusion ni sulfosel) si ce n'est la présence de cobaltite (uniquement dans le mispickel). La paragenèse semble indiquer que le gisement est d'origine volcano-sédimentaire (ancien) ou hydrothermal sédimentaire (diagénèse). Un télescopage de différentes minéralisations est concevable (plusieurs températures de dépôt).

3.4.7. Etude géochimique sur le site minier de Promise

3.4.7.1. Géochimie régionale des roches

Nous avons traité statistiquement 35 résultats d'analyses de roches répartis (Fig.114) sur les principaux faciès pétrographiques de notre terrain : grès micacés (19 échantillons), schistes noirs (14 échantillons) et conglomérats (2 échantillons).

Tableau des teneurs en ppm (loi log-normale)

	b	b + 1s	b + 2s	b + 3s	Gamme de teneur (d'après Reedman 1979)
Pb	30	70	165	385	16 - 20
Zn	115	205	365	650	50 - 300
Cu	25	67	179	475	20 - 150
Ni	305	622	1 267	2 583	20 - 100
Co	29	41	58	81	10 - 50
Cr	134	329	806	1 973	10 - 160

Remarques

Les roches situées à proximité du gisement ont des teneurs en métaux utiles supérieures aux autres roches, en particulier pour Zn, Pb, Cu et Co.

Ni reste à la périphérie du gisement.

Cr est peu représenté sur cette carte, mais presque toutes les teneurs se situent entre b et b + 1s. La pollution en Cr, au moment du broyage des roches aux anneaux est probablement responsable des hautes teneurs en Cr des roches.

Par comparaison avec les valeurs moyennes classiques dans les roches, d'après Reedman (1979), les roches de la zone briançonnaise de la Thuile montrent un enrichissement en Pb et en Ni. Les autres éléments ne laissent pas apparaître d'enrichissement par rapport aux roches types.

Répartition en fonction de la lithologie (Schistes et Grès)

Tableau des moyennes, des écarts-types et des variabilités

Eléments	Schistes			Grès		
	Moyennes	Ecartstypes	Variabilités	Moyennes	Ecartstypes	Variabilités
Pb	46	28	0,60	34	19	0,56
Zn	155	117	0,75	133	153	1,15
Cu	48	36	0,75	16	14	0,87
Ni	271	196	0,72	481	305	0,63
Co	35	11	0,31	26	7	0,67
Cr	186	103	0,55	164	110	0,67

Les abondances et les variabilités géologiques sont du même ordre de grandeur pour les schistes et les grès.

3.4.7.2. Géochimie des haldes de la mine de Promise

Nous avons échantillonné 30 kg de tout venant dans les haldes au niveau le plus bas de la mine (galerie Saint-Pierre). Nous avons concassé, quarté et analysé les roches. Cette étude peut permettre d'obtenir une estimation des teneurs en éléments utiles d'un ancien gisement (tableau 9a).

Teneurs en éléments utiles :

Eléments	Teneurs du tout-venant
Pb	0,6 à 2,9 %
Zn	0,4 à 1,7 %
Cu	0,5 à 2,3 %
Ag	195 à 236 g/t de tout-venant.

Ramené à la galène, Ag offre des teneurs importantes : 6,6 kg d'Ag/t de galène.

Les teneurs de Pb et de Zn indiquées dans les rapports miniers antérieurs sont plus fortes que celles obtenues ici. Les haldes ne sont pas réellement représentatives de la minéralisation car il s'agit d'un matériel appauvri par rapport au minerai pur. Notons enfin que la quantité d'échantillon peut être insuffisante.

3.4.7.3. Géochimie du minerai de Promise

Nous avons échantillonné le minerai dans différents niveaux de la mine : galeries Saint-Pierre, Saint-Maurice, Saint-Alfred et Argentière. Les résultats d'analyse par activation neutronique sont indiqués dans le tableau 9b.

La moyenne des teneurs de Ag sur 10 échantillons du minerai est de 685 g/t. Celle de Au est de 3,8 g/t. L'analyse en roche totale par fluorescence X et spectrométrie d'émissions montre un enrichissement en Ni, Co et Cr dans le minerai (tableau 9b).

Les teneurs de Ag et de Au du minerai sont importantes et confirment les résultats obtenus sur les haldes.

3.4.7.4. Relations entre minerai et encaissant (Fig.115)

Dans la galerie Saint-Maurice, perpendiculaire à la minéralisation, nous avons prélevé 11 roches à intervalle régulier de 4 mètres. Les points 2, 3 et 4 correspondent à la minéralisation, les autres à la roche encaissante (longueur de la galerie : 50 m).

L'analyse géochimique des roches montre une évolution brusque entre la minéralisation et les roches encaissantes.

Les courbes des teneurs Hg, Pb, Cu, Zn et Ag indiquent une différence chimique nette entre la minéralisation et les roches encaissantes.

Les teneurs en Hg, Zn, Cu, Pb, Ag sont élevées dans la minéralisation (points 2, 3 et 4). Les mêmes éléments, pris dans la roche encaissante, ont des niveaux de concentration correspondant à la teneur de fond régionale (paragraphe 3.4.7.1.).

Nous pensons que les matériaux utiles de la minéralisation ne proviennent pas d'un drainage à partir des roches encaissantes. Géochimiquement, l'encaissant et la minéralisation sont indépendants.

3.4.8. Conclusions

Sur la genèse de la minéralisation de Promise, il serait peut-être préférable d'envisager soit un mécanisme d'érosion, de transport et de sédimentation ayant entraîné la formation des quartzites et des métaux utiles (Dars, Allègre et Michard, 1971), soit un mécanisme hydrothermal (Bonatti, 1975) mettant en place une minéralisation stratiforme (Pocachard, 1980) dans la zone briançonnaise externe.

3.5. INTERPRETATION GEOLOGIQUE DES RESULTATS GEOPHYSIQUE ET GEOCHIMIQUE SUR LE SITE DE PROMISE

3.5.1. Introduction

Le problème posé, au commencement de nos travaux dans le Val d'Aoste, était d'étudier les gisements de la Région du Val d'Aoste et de rechercher éventuellement, dans les cas favorables, leur prolongement en adaptant de nouvelles techniques à la recherche minière.

Après avoir inventorié les plus importants, nous les avons sélectionnés. Notre choix porte sur des gisements (Hérin, Brusson, Promise) qui ont eu un intérêt économique auparavant et qui ont été abandonnés sans étude géologique sérieuse de la part des exploitants. Souvent de simples études géologiques sur un site minier abandonné ont permis de reconsidérer le gisement et de le réexploiter : Alagna dans le Val Sesia en est un exemple.

Le gîte minier de Promise, dans le Val Rutor, a attiré notre attention du fait qu'aucune étude géologique n'ait été entreprise avant son abandon et que ce gisement soit situé dans la vaste province métallogénique de la zone briannonnaise externe (paragraphe 3.4.3.).

La prospection du site de Promise a été menée en trois temps :

- 1) Essais préliminaires des méthodes de prospection sur l'ancienne exploitation de Promise (adaptation des méthodes) ;
- 2) Prospection systématique à proximité puis aux environs du gîte minier (étendue de la minéralisation) ;
- 3) Prospection de type tactique sur les zones qui se sont révélées intéressantes (construction des cartes géophysiques).

Plusieurs méthodes de prospection ont été superposées sur notre terrain : deux prospections géophysiques (polarisation spontanée et magnétométrie), trois études géochimiques (stream sediments, sols et roches).

3.5.2. Développement

Nous proposons dans ce chapitre l'interprétation géologique sur le site minier de Promise :

- de la prospection régionale par polarisation spontanée et magnétométrie ;
- de deux prospections géophysiques de type tactique avec les deux méthodes vues précédemment ;
- des prospections géochimiques par stream sediments et sols.

3.5.3 Prospection géophysique à caractère régional

3.5.3.1. Introduction

Après avoir reconnu la géologie du gisement de Promise, nous avons pour but de rechercher les éventuels prolongements de la structure minéralisée.

L'extension connue de l'exploitation est hectométrique (Fig.109) : galeries Saint-Jacques, Argentière, Saint-Maurice, Saint-Alfred et Saint-Pierre. A l'extrémité NE du gisement, la galerie de recherche Saint-Georges est dépourvue de minéralisation (cette galerie est peu profonde et son extension est réduite à quelques dizaines de mètres). Entre le col de la Croix et la mine de Promise une galerie de recherche, Saint-Eugène, s'ouvre à 2 000 m d'altitude ; la galène et la blende y affleurent dans une gangue quartzreuse. Au col de la Croix, les éboulis grossiers révèlent la présence de quartz blanc feinté par des hydroxydes de fer, semblable à celui de la mine de Promise. Les caractères géologiques de ces trois points semblent donc favorables à la présence d'une minéralisation sulfurée de même type que celle du gisement de Promise.

Nous nous sommes proposés de rechercher une continuité géologique entre ces trois points par polarisation spontanée (Fig.119a).

A l'Ouest du gisement de Promise, vers le col du Petit-Saint-Bernard, nous ne connaissons pas d'indice qui puisse orienter la prospection géophysique. Nous savons que la minéralisation sulfurée de Promise suit la limite géologique (schistes noirs-grès) définie dans le paragraphe 3.3.1. La prospection vers l'Ouest a été guidée par ce repère géologique et stratigraphique jusqu'au Mont Belvédère. Deux méthodes ont été utilisées : la polarisation spontanée et la magnétométrie (Fig. 119 b et 135).

La présentation géologique régionale est faite dans les paragraphes 3.3. et 3.4.

3.5.3.2. Prospection par polarisation spontanée

3.5.3.2.1. Profils de reconnaissance (Fig. 109)

En 1979, nous avons réalisé au-dessus et dans la mine de Promise des essais de géophysique électrique (polarisation spontanée et résistivité). Les mesures de résistivité se sont révélées fastidieuses. La polarisation spontanée a été plus efficace compte tenu des conditions de travail difficiles.

3.5.3.2.1.1. Profils de reconnaissance dans la mine de Promise

Le profil de reconnaissance A (Fig.116), le long de la galerie Argentière, met en évidence une rupture de potentiel de 350 mV d'amplitude entre la minéralisation et la roche encaissante.

Le profil perpendiculaire à la structure minéralisée et la distance entre chaque point de mesure est de 1 m. Les mesures étant faites selon une base de référence, quelconque dans le cas des profils de reconnaissance uniquement, le signe du potentiel ne devrait pas être précisé.

Deux autres profils B et C construits en direction de la couche minéralisée (niveaux Argentière et Saint-Maurice) montrent une succession de puits et de dômes de potentiel (profils B et C, Fig.117). La géométrie lenticulaire (dimension décimétrique) du gisement provoque de telles anomalies.

3.5.3.2.1.2. Profil de reconnaissance à l'aplomb de la mine

Le profil D construit perpendiculairement à la minéralisation sulfurée nous permet de faire les remarques suivantes (Fig. 118) :

- 1 pic négatif étroit révèle l'affleurement de la structure minéralisée,
- 1 pic négatif large révèle la présence d'une structure minéralisée en profondeur,
- l'amplitude du puits de potentiel est de l'ordre de 400 mV.

L'imprécision de la base de référence ne nous permet pas d'apprécier ces anomalies à une minéralisation sulfurée ou à une minéralisation graphiteuse ou aux deux.

Apparemment la polarisation spontanée répond bien à notre problème : mettre en évidence une structure minéralisée. Mais la paragenèse complexe du minerai (sulfures et graphite) ainsi que les caractères géologiques du site de Promise (sédimentation de bassin anthracifère) entraînent des complications sur l'interprétation des anomalies (anomalies complexes et composites, P. Gex, 1977 et communication orale).

3.5.3.2.2. Mesures de polarisation spontanée

En 1980, nous avons affectué 56 profils de polarisation spontanée avec deux équipes de deux prospecteurs. La longueur moyenne des profils est de 600 m.

Les profils se répartissent selon l'orientation des structures géologiques, partant du Lac d'Arpy, passant par le col de la Croix, rejoignant la mine de Promise, montant à la Grande Tête et se terminant au Mont Belvédère, soit environ 15 km. La plupart des profils sont perpendiculaires à cette ligne brisée qui représente virtuellement la projection de la structure minéralisée sur la surface topographique.

La base de référence de toutes les mesures de potentiel a été établie à partir des profils 14 et 15 (Fig.119a).

La représentation des mesures est faite sous deux formes : les cartes de polarisation spontanée et les profils (Fig.119 et 120).

3.5.3.2.2.1. La carte de polarisation spontanée

Nous n'avons pas réalisé une carte d'équipotentielle pour les raisons suivantes :

- la réalisation des profils est irrégulière et en moyenne l'interpolation des équipotentielles entre deux profils éloignés (200 m) semble délicate et douteuse,
- les variations de potentiel le long d'un profil sont nombreuses. De ce fait, certaines corrélations entre profils adjacents se révèlent aléatoires.

C'est pourquoi nous préférons la représentation par des surfaces de potentiel : cinq figurés hachurés de plus en plus sombres soulignent les plages négatives.

- Secteur Promise - Col de la Croix (Fig.120 a).

L'allongement des plages négatives est NO à N45°. Cette direction est parallèle aux couches traversées mais il ne faut pas oublier que la disposition des profils favorise cet étirement.

La mine de Promise, la galerie de recherche Saint-Eugène et le col de la Croix sont situés sur les bordures des plages -600 à -800 mV. Ce champ d'anomalie semble donc être associé à la minéralisation sulfurée de la mine de Promise. La carte de polarisation spontanée présentée en figure 120 donne une vue d'ensemble du champ de potentiel, de son étendue et de sa direction. Elle permet aussi de dégager les zones susceptibles de contenir une minéralisation et d'éliminer les zones stériles. L'interprétation présente néanmoins quelques difficultés dans la région anthracifère de la Thuile, il n'est pas impossible de rencontrer des lentilles de matière carbonneuse sans sulfure.

Nous ne pouvons pas exclure l'hypothèse suivante : le champ d'anomalies est la manifestation d'anthracite seul (plage négative liée à l'anthracite à l'Ouest de la plage de Promise). L'association minéralogique sulfures-graphite a été rencontrée dans le minerai de Promise. La valeur du champ d'anomalie (plage -600 à -800 mV) semble plutôt associée au graphite qu'aux sulfures. De ce fait le graphite peut être le traceur d'une minéralisation sulfurée. Ceci est vrai pour la plage négative incluant la mine de Promise. Nous ne pouvons pas avoir obligatoirement le même raisonnement pour les autres plages (galerie Saint-Eugène et col de la Croix) ne connaissant pas les paragenèses minérales. Le fait de rencontrer dans le champ d'anomalie deux zones parallèles, plage négative du col de la Croix et celle parallèle au NW montre l'existence de deux niveaux conducteurs qui pourraient représenter dans le cas favorable, deux niveaux sulfurés. Cette interprétation n'est pas irréaliste. A l'échelle du gisement de Promise nous connaissons au moins deux niveaux de sulfures parallèles.

-Secteur Val Ruitor-Chaz Duraz (Fig.120 b)

L'allongement des plages négatives est N 50 à N 90 °. Les orientations sont parallèles aux structures géologiques du secteur (la répartition du profil favorise cet étirement). Nous retrouvons dans ce secteur la même amplitude des champs d'anomalie (-600 à -800 mV) que sur le secteur Promise-col de la Croix. Compte tenu d'observations faites en d'autres lieux et que nous ne pouvons pas développer commodément dans ce mémoire, nous pouvons avancer l'idée que la plage inférieure à -800 mV (noir) est due à l'électrofiltration qui accentue la tendance négative. Elle correspond en outre à une zone où l'anthracite est abondant.

Cependant, il est à remarquer que l'indice de la Ruine (zone I, secteur Chaz-Duraz, paragraphe 3.3.3.1.) découvert par magnétométrie, se situe sur la limite SE de la plage négative (même type de situation que pour le secteur Promise -Col de la Croix). Les observations faites sur la carte précédente au sujet de la nature des paragenèses minérales liée aux anomalies électriques peuvent être reprises dans le cas du secteur Val Ruitor -Chaz-Duraz.

Afin d'obtenir plus de détails sur l'interprétation d'une anomalie, nous aurons recours aux profils de polarisation spontanée.

3.5.3.2.2.2. Analyse des profils de polarisation spontanée les plus caractéristiques

Profils 18, 20 et 21 (Fig. 121, 122 et 123).

Ces trois profils traversent perpendiculairement la minéralisation sulfurée de Promise. Ils montrent deux anomalies distinctes et d'amplitudes semblables (-800 à -900 mV). Elles sont séparées par un dôme au potentiel zéro qui s'élargit vers le Nord à la faveur de l'extension d'une zone d'éboulis. L'anomalie Est est corrélée avec la minéralisation sulfurée de Promise tandis que l'anomalie Ouest est située à l'aplomb des schistes noirs anthracifères.

Profil 14 (Fig.124)

Situé à 300 m au Nord de la mine de Promise, ce profil, long de 850 m entre 1 500 m et 1 850 m d'altitude, a les mêmes caractères que les profils précédents. De plus, la remontée au zéro du potentiel est constante sur 250 m (base de référence pour toute la prospection). Le bruit de fond est de 200 mV. Le gradient de l'électrofiltration vaut 0,2 mV sur les éboulis et 0,35 mV/m sur les roches sub affleurantes, selon une pente topographique de 25 à 35°. Ces valeurs sont relativement faibles (terrains détritiques secs).

Ce profil montre que les deux anomalies Est et Ouest s'éloignent lorsque nous nous déplaçons vers le Nord (la zone d'éboulis s'élargit vers le Nord). L'anomalie Est est constituée de deux pics négatifs importants (-900 mV) encadrés par deux pics moins négatifs (-450 mV).

Cette anomalie, composite et enregistrée sur des roches sub affleurantes, est soulignée par une symétrie des pics et par une remontée au même potentiel, ce qui prouve que la structure minéralisée recoupe nettement la surface topographique.

Profil 11 (Fig. 125)

Le profil 11, long de 900 m entre 1 750 m et 2 250 m d'altitude, montre deux anomalies importantes. L'anomalie Ouest de ce profil est le prolongement de l'anomalie Est des profils 14-18-20 et 21. Elle est probablement liée à une structure minéralisée (sulfure ou graphite ?). L'anomalie Est du profil 11 est difficilement corrélable avec les anomalies Est des profils précédents, c'est pourquoi nous pensons qu'il s'agit de la manifestation d'un autre niveau minéralisé. En composant l'effet de l'électrofiltration, l'amplitude des pics

est de l'ordre de -600 mV à -700 mV, ce qui est encore fort négatif pour des sulfures (la présence de graphite dans la minéralisation est vraisemblable). La galerie de recherche Saint-Eugène, où affleurent la galène et la blende, est située dans le prolongement de cette anomalie qui est donc probablement liée à une minéralisation sulfurée. L'extension de l'anomalie s'accroît vers le NE et se divise avant d'atteindre le col de la Croix.

Profil 4 (Fig. 126)

Ce profil se situe sur une arête N-S passant par le col de la Croix. Au niveau du col s'ouvre un large pic négatif (-500 mV) sur 400 m. Il peut être associé soit à une structure minéralisée cachée large et profonde, soit à un réseau de fractures qui jalonne le col et engendre des infiltrations d'eau.

Profil 1 (Fig. 127)

En suivant les structures géologiques et en estimant le tracé de la structure minéralisée, nous aboutissons en amont du lac d'Arpy. Le profil 1, long de 600 m entre 2 125 m et 2 066 m (lac d'Arpy), ne possède pas d'anomalie importante. Le potentiel reste dans l'intervalle du bruit de fond (0 mV à -200 mV) avec une légère tendance négative juste en aval du lac. Sommes-nous en présence d'une anomalie, la structure minéralisée disparaît-elle ? Le profil n'est pas assez long vers le Nord pour le confirmer.

Profils 23 et 24 (Fig. 128 et 129)

En rive gauche du torrent Ruitor le profil 24 (Fig. 129) présente une succession d'anomalies. Malgré la complexité de l'interprétation de ce profil, nous avons pu mettre en évidence, sous la plus large des anomalies de -900 mV et en examinant soigneusement les affleurements, un banc de quartz blanc et de pyrite disséminée recouvert d'une altération blanchâtre (hydroxyde de fer). Les caractères géologiques de cet affleurement sont identiques à ceux de la minéralisation sulfurée de Promise. Cette dernière se prolonge probablement vers le versant gauche du Val Ruitor. La géochimie des stream sediments du Val Ruitor confirme cette hypothèse. La géométrie de l'anomalie, apparemment associée à la minéralisation sulfurée (Fig. 128), se compose d'un pic négatif étroit encadré par deux pics moins négatifs dissymétriques. Le pendage SE des structures géologiques est peut être responsable de cette dissymétrie. Cette interprétation peut être discutée étant donné que ce profil est complexe.

Profil 25 (Fig. 130)

A la hauteur de ce profil la couverture végétale est importante. Les repères géologiques sont inexistant. L'orientation N-S du profil est approximativement perpendiculaire à la direction des structures géologiques. Deux niveaux conducteurs Nord et Sud se remarquent par deux anomalies profondes. L'anomalie Sud difficilement corrélable avec la structure minéralisée de Promise, marque une plage négative parallèle à la plage de Promise (Fig. 120a). L'anomalie Nord est directement associée à la structure minéralisée de Promise. Cette anomalie Nord est scindée en deux pics négatifs par une remontée partielle au zéro du potentiel causée par des roches aux effets de polarisation moindre comme le conglomérat à éléments quartzeux. En effet, nous rappelons que les deux niveaux sulfurés de la structure minéralisée de Promise (paragraphe 3.4.5.) sont séparés par un banc conglomératique.

Les profils 26 à 32 ne seront pas décrits car il n'apportent pas d'éléments nouveaux pour la compréhension de nos recherches (Fig. 120b).

A partir du profil 33 et jusqu'au 56, nous avons rencontré sur le plateau Chaz-Duraz un recouvrement important de neige (juillet 1980). La disposition des profils a été guidée par les affleurements du sol. L'orientation des profils n'est plus perpendiculaire aux structures géologiques mais oblique ou sub parallèle. Les anomalies de certains profils se trouvent très étendues. Compte tenu des corrections topographiques à apporter, nous n'avons pas envisagé l'interprétation de telles anomalies. Il serait souhaitable de refaire cette prospection dans de meilleures conditions.

Profil 33 (Fig. 131)

Le profil 33 est marqué par une large et profonde dépression de -900 mV, encadrée par une remontée brusque au zéro du potentiel (9,5 mV/m) au Sud et une remontée douce (1,5 mV/m) au Nord. Au centre de l'anomalie, nous avons observé sur le terrain des roches en place relativement riches en pyrite. C'est peut-être là le signe d'une minéralisation sulfurée.

Cette anomalie importante se poursuit à l'Ouest de la Grande Tête (plage négative de la Grande Tête, (Fig. 120b).

- Profil 39 (Fig. 132)

Au Sud de la Grande Tête le profil 39 montre deux anomalies importantes (-700 mV). L'anomalie Nord semble indépendante de l'anomalie de la Grande Tête et liée à la fracturation régionale. L'anomalie Sud est aussi profonde que la Nord. Elle est marquée par un pic étroit que nous retrouvons sur les profils 37-40-41-42 et 56 qui souligne la traversée du Torrent Ponteilles. L'orientation de ces anomalies Sud et Nord est nettement E-W. Dans l'étude structurale (paragraphe 3.3.3.3.), nous avons remarqué que la fracturation E-W domine dans la région de La Thuile. L'anomalie E-W résulte de cette fracturation régionale E-W.

- Profils 48-49-51-52-53 et 54 (Fig. 119b)

La prospection magnétique et la prospection par polarisation spontanée à maille régulière recouvrent l'étude de ces profils. Il s'en dégage une forte anomalie parallèle à une minéralisation sulfurée (cet indice est situé à la limite SE de la plage négative inférieure à -800 mV, Fig.120b et paragraphe 3.5.4.).

-Profils 55 et 56 (Fig. 119b)

Ces deux profils qui longent l'arête du Chaz-Duraz au Mont Belvédère, délimitent la partie Ouest de notre prospection. Ces deux profils sont réguliers et négatifs (-1 000mV). Les roches des deux sommets contiennent de l'antracite (indices d'antracite connus dans le Mont Belvédère ; carte géologique).

L'extrémité Sud du profil 56 est marquée par la remontée brusque au zéro potentiel. Cette remontée se produit lorsque nous traversons le torrent Ponteilles. Le faciès des roches change complètement au Sud de cette ligne (micaschistes).

3.5.3.2.3. Conclusions

La prospection par polarisation spontanée met en évidence des plages négatives susceptibles de contenir une minéralisation de même nature que celle de la mine de Promise. Elles concordent parfaitement avec les structures géologiques et les indices minéralisés connus de la région.

Pour lever l'indétermination sur la nature géologique des structures responsables des anomalies, la polarisation spontanée n'est pas réellement efficace sur notre terrain (antracite ou graphite, graphite et sulfures, sulfures ?). Une autre méthode d'investigation est nécessaire : nous avons choisi la magnétométrie.

3.5.3.3. Prospection magnétique

3.5.3.3.1. Profils de reconnaissance

Au-dessus de la mine de Promise nous avons construit un profil orienté N-S, de 300 m de longueur, à l'altitude constante de 1 578 m et centré sur l'entrée de la galerie Saint-Pierre (Fig. 133). L'espacement entre les mesures magnétiques le long du profil est de 5 m. Le passage d'un magnétomètre à protons sur les haldes de la galerie Saint-Pierre a permis d'enregistrer des effets magnétiques étroits, positifs et négatifs par rapport au champ moyen de 46265 γ . Les débris métalliques (tuyaux, barres à mine) abandonnés par les mineurs sont responsables de ces anomalies. Toutefois, en filtrant la courbe, il reste un effet magnétique dû aux haldes de la galerie de Saint-Pierre. En conclusion à ce test, le minerai réparti dans ces haldes (entre autre pyrrhotite) est magnétique.

Le profil de reconnaissance construit en rive gauche du torrent Ruitor montre que la structure minéralisée de Promise crée des effets magnétiques (Fig.134). Ce profil non représenté sur la figure, orienté N-S, de 150 m de longueur, longe le torrent Ruitor. L'extrémité Nord du profil est située sur l'alpage de Promise (Fig.135).

Après lissage de la courbe nous observons une anomalie impaire de 50 γ à l'aplomb de la minéralisation (celle-ci a été découverte également par polarisation spontanée profil 24, Fig. 129). L'allure de la courbe (anomalie impaire) indique un pendage Sud de la structure ce qui est cohérent avec les observations géologiques.

3.4.3.3.2. Mesures magnétiques

L'implantation des profils magnétiques se superpose à celle des profils de polarisation spontanée mais l'ensemble de la prospection par polarisation spontanée n'est pas recouverte par l'étude magnétique. Le magnétomètre à protons était indisponible au début de notre prospection. Seul le secteur Val Ruitor - Chaz Duraz a été étudié. Un complément d'étude magnétique sur le secteur Promise - Col de la Croix devrait terminer la prospection régionale.

Nous avons établi 25 km de profils magnétiques en 15 jours avec une équipe de deux prospecteurs. La plupart des profils sont orientés N-S (le recouvrement de neige n'entrave pas la prospection magnétique). La représentation des mesures est faite uniquement sous la forme de profils.(Fig. 135).

Une carte magnétique n'est pas réalisable à l'échelle régionale car les profils sont trop espacés.

Dans la région de La Thuile, le champ magnétique terrestre est de 46240γ ($1 \gamma = 10^{-5}$ Oe), en dehors de toute zone d'anomalies. Le bruit de fond est de 10 à 20γ .

- Profil 1 (Fig. 136).

Ce profil a été construit à l'extrémité NE de la mine de Promise. Apparemment aucun effet magnétique supérieur au bruit de fond n'accompagne le prolongement du gisement de Promise. Une anomalie impaire étroite de 240γ d'amplitude dans le fond de la vallée souligne une ancienne galerie de la mine d'anthracite de La Thuile).

- Profil 2 et 3 (Fig. 135)

Ils traversent perpendiculairement le gisement de Promise. La minéralisation en place, sub affleurante, ne donne pas d'effet magnétique. Par contre, nous avons observé un effet magnétique en passant sur le minerai réparti dans les haldes de la galerie de Saint-Pierre où la pyrrhotite a été décelée (profil de reconnaissance sur la mine). Quant à l'absence de phénomène magnétique au-dessus du minerai en place, nous retenons deux hypothèses :

- la pyrrhotite en place sub affleurante est altérée en surface ce qui réduit ou élimine les effets magnétiques (J. Pocachard 1977) ;
- la pyrrhotite est saine mais trop profonde pour être détectée par le magnétomètre Géométrix. Il faut un magnétomètre plus sensible et utiliser la méthode différentielle (Collin et al., 1973).

- Profils 4 et 5 (Fig. 137 et 138)

Les profils 4 et 5 sont situés sur l'extrémité SW du gisement de Promise. Ils longent la rive droite du torrent Ruitor (Fig. 135). Le profil 4 montre des effets magnétiques brusques au NW (effets parasites) puis une remontée à la valeur du champ ambiant 46250γ au SE. La partie exploitable de ce profil (exclusion de la zone chahutée), plus particulièrement la remontée progressive de la courbe, et l'anomalie du profil 5 se corrélerent aux anomalies de polarisation spontanée précédentes (paragraphe 3.5.3.2.2.) et donc à l'éventualité

d'une structure minéralisée. Remarquons déjà que contrairement à la mine de Promise, cette éventuelle minéralisation est magnétique.

Profil 7 (Fig. 139)

La présence d'une minéralisation en rive gauche du torrent Ruitor semble être confirmée par le profil 7. Malgré quelques effets parasites nous distinguons une anomalie impaire de 40γ d'amplitude sur 110 m de longueur (partie S du profil).

- Les profils suivants (jusqu'au numéro 16) ne manifestent aucun effet magnétique (Fig. 135). Il est trompeur de conclure au fait que cette zone est dépourvue de corps magnétique : le nombre des profils est insuffisant. Il serait intéressant d'étudier plus intensément par magnétométrie la plage aux potentiels fortement négatifs de la Grande Tête.

En progressant vers l'Ouest le champ magnétique terrestre est beaucoup plus animé et a tendance à se calmer lorsque nous nous approchons du Mont Belvédère. Ces variations du champ peuvent s'inscrire dans le cadre d'une anomalie régionale. Deux cartes magnétiques ont été construites dans cette zone à l'emplacement des plus fortes anomalies (paragraphe 4.3.1. et 4.3.2.).

Les effets magnétiques de forte amplitude (3000γ , profil 24) et de moyenne amplitude (100 à 300γ , profils 17, 18, 19, 20, 21, 23 et 25) semblent se distribuer sur une ligne droite orientée $N 50^\circ$ (Fig. 135). Par ailleurs nous notons que l'allure des courbes indique un pendage Sud des corps magnétiques. Cette ligne droite $N 50^\circ$ correspond à la limite SE de la plage fortement négative de polarisation spontanée des monts Belvédère et Chaz-Duraz (Fig. 120).

3.5.3.3.3. Conclusions

La magnétométrie a permis de distinguer une plage à forts effets magnétiques (SE des monts Belvédère et Chaz-Duraz) et une plage à faibles effets (torrent Ruitor).

Les effets près du torrent Ruitor (sud de l'alpage Promise) n'excèdent pas quelques dizaines de gammas et semblent être créés par une source magnétique subaffleurante, d'extension décimétrique de nature pétrographique inconnue, située dans le prolongement du gisement de Promise. La continuité de la structure minéralisée de Promise vers l'Ouest est vraisemblable.

Les effets magnétiques des monts Belvédère et Chaz-Duraz sont parallèles aux effets de polarisation spontanée. Les caractères géologiques de cette région sont comparables à ceux du gisement de Promise (direction N 45°, pendage SE, situation stratigraphique et nature pétrographique comparables, extension décamétrique). Sans pouvoir conclure à un éventuel prolongement de la mine de Promise jusqu'au Mont Belvédère, il paraît tout à fait concevable de voir la zone Belvédère - Chaz Duraz comme un site dont la potentialité minière est loin d'être négligeable et reste donc à étudier plus en détail.

3.5.4. Prospection géophysique à caractère tactique

3.5.4.1. Introduction

A partir de l'étude géophysique régionale nous avons sélectionné deux zones ayant des effets magnétiques et électriques intenses sur le plateau Chaz-Duraz : zones I et II (Fig. 140). Nous avons construit des cartes magnétiques et électriques sur ces zones afin d'apporter une interprétation précise des phénomènes en essayant d'établir des données quantitatives (dimension, géométrie et tonnage des corps perturbateurs).

L'étude géochimique (stream sediments, sols) est nécessaire pour connaître la nature pétrographique des corps qui provoquent les effets magnétiques ou électriques. Le détail des méthodes de prospection est indiqué dans la première partie.

3.5.4.2. Zone I

3.5.4.2.1. Données géologiques (Fig. 141)

Les levés magnétiques et électriques sont effectués sur une colline située géologiquement dans les schistes noirs et grès micacés. Une zone silicifiée (quartz noir) de 45 m de puissance sur 120 m de longueur traverse la zone I suivant une orientation N 40° et semble interstratifiée dans les roches encaissantes. Le contact entre la roche encaissante et la zone silicifiée est généralement masqué par le sol résiduel ou la neige.

La description du quartz est faite dans le paragraphe 3.3.4.1. Au SE de la masse quartzeuse, les grès micacés dominent les faciès. Au NW, les quelques rares affleurements montrent une légère tendance aux schistes noirs. A 50 m au NW des ruines, une exploitation artisanale met à jour une poche d'anthracite (G).

La masse quartzeuse comporte des enclaves métriques de schistes noirs dont l'allongement est parallèle à la schistosité régionale N 40°. Des lentilles de quartz noir s'intercalent dans les grès micacés.

La stratification So est N 30° à N 40° pentée de 60° vers le SE. La schistosité S1, intense, est N 40° pentée de 40° vers le SE. La fracturation est dense. Les failles N 90° verticales, fréquentes, sont dépourvues de minéralisation ainsi que les failles N 120° pentées de 20° vers le SW. Une structure étroite et linéaire (30 cm de large sur 2 m de longueur), orientée N 0° dans la masse quartzeuse est minéralisée en pyrite disséminée. Nous avons ramassé dans les éboulis, des blocs centimétriques de quartz et de pyrite disséminée.

La masse de quartz noir de la zone I semble de même origine que celle de la mine de Promise (paragraphe 3.4.8.).

Les eaux des ruisseaux qui traversent la zone prospectée sont fortement ferrugineuses.

3.5.4.2.2. Données géophysiques

3.5.4.2.2.1. Carte magnétique (Fig.142)

Dans la région de La Thuile le champ magnétique terrestre est de 46240 γ ($1\gamma = 10^{-5}$ Oe), en dehors de toute zone d'anomalies. En conséquence cette valeur correspondra à la référence zéro des cartes (cartes résiduelles en champ total).

3.5.4.2.2.1.1. Observation de la carte

Nous remarquons :

- une grande anomalie au centre de la zone ;
- l'amplitude de l'anomalie est de 4 000 γ ; son extension est décamétrique (Fig. 143), ce qui suppose une aimantation élevée ;
- l'orientation de la droite (D) passant par les pôles A et B de l'anomalie, diffère du Nord magnétique; cela peut s'expliquer par une aimantation rémanente élevée. En effet, un corps magnétique possède une aimantation induite \vec{J}_i (Fig. 144) parallèle au champ magnétique ambiant et une aimantation rémanente \vec{J}_r , indépendante de l'orientation de ce champ actuel et résultant de phénomènes magnétiques et tectoniques anciens (paragraphe 1.2.6. de la première partie, Pocachard, 1980). L'aimantation globale J est dirigée

suisant (D), allant du + vers le -, c'est-à-dire de A vers B. Pour J_i donnée, J_r vaut au minimum : $\sin \alpha |J_i|$, ce qui correspond dans ce cas à un effet rémanent au moins du même ordre de grandeur que J_i . Une difficulté se présente au niveau de l'interprétation ; nous ne connaissons pas la valeur de J_r . Ce problème pourrait être résolu par une étude paléomagnétique et structurale.

L'analyse de la carte magnétique nous permet de faire les remarques suivantes :

- nous distinguons une anomalie AB prépondérante dans un contexte magnétique relativement calme, ce qui correspond à priori à la présence d'un corps aimanté dans un encaissant peu magnétique (les résultats de susceptibilité magnétique confirment cette interprétation, paragraphe 3.5.5.) ;
- les orientations $N 40^\circ$ et $N 130^\circ$ des isogrammes sont causées probablement par la géométrie du corps magnétique ;
- l'orientation $N 0^\circ$, que nous remarquons dans la région Ouest de la zone I à faible gradient, est due aux variations diurnes du champ magnétique. Ces variations peuvent être éliminées au niveau de la mesure par une méthode différentielle (Collin et al., 1973) ;
- l'anomalie AB est provoquée par un corps magnétique que nous assimilerons en première approximation à un dipôle situé à 20 m de profondeur, à l'aplomb de l'anomalie ; le résultat de cette estimation est donné par l'écartement des pôles A et B ;
- la région NW de l'anomalie est marquée par un champ perturbé, ce qui signifie que le corps magnétique est près de la surface. Les variations spatiales du champ magnétique s'atténuent en allant vers le SE ce qui peut s'expliquer par un plongement du corps aimanté suivant cette orientation. L'évasement des isogrammes de l'anomalie vers le SE indique que le corps conserve ses dimensions et même augmente probablement de volume en profondeur ;
- compte tenu de l'anomalie, le corps magnétique a des dimensions décimétriques, en l'assimilant en deuxième approximation à un parallépipède rectangle cadré dans les orientations $N 40^\circ$ et $N 130^\circ$, d'extension selon $N 40^\circ$ de 30 m en moyenne et sans pouvoir préciser les dimensions selon $N 130^\circ$;
- le moment magnétique \vec{M} s'exprime de manière très simplifiée par $M = Hr^3$ ($H = 4\ 000 \text{ Oe}$ et $r = 20 \text{ m}$). Il s'ensuit que $M = 3.10^8 \text{ uém CGS}$; \vec{M} étant lié à \vec{J} par la relation $J = \frac{M}{V}$ (V volume en cm^3), V vaut $10^7 \times \text{cm}^3$ pour un parallépipède aux dimensions décimétriques (en moyenne 30 m de côté, x étant l'épaisseur)

x en m	1	6	12	25	50
J en uém CGS	0.3	5.10^{-2}	$2,5.10^{-2}$	$1,3.10^{-2}$	6.10^{-3}
V en m^3	10^3	5.10^3	10^4	2.10^4	4.10^4

Au delà de cette limite le plongement est NW.

Nous constatons que l'épaisseur x est nécessairement inférieure à 30 m, sinon le corps magnétique a un plongement NW, ce qui est contradictoire avec ce qui a été dit précédemment.

L'aimantation est essentiellement due à la présence de pyrrhotite dans la minéralisation (paragraphe 3.4. et 3.5.6.1.). La magnétite, si elle existe, n'est qu'en très faible proportion. Il en résulte que la susceptibilité k moyenne du corps magnétique est de l'ordre de 0,05 (C.G.S.). L'aimantation induite par le champ terrestre ($H = 0,4 \text{ Oe}$) vaut par conséquent :

$$J_i = kH = 0,02 \text{ u.é.m. C.G.S.}$$

En posant

$$J = 1,5 J_i$$

l'aimantation totale est

$$J = 0,03 \text{ u.é.m. C.G.S.}$$

En comparaison avec les résultats du tableau précédent, nous pouvons conclure que le corps magnétique a une puissance x de 10 m au maximum, donc un volume de $9\ 000 \text{ m}^3$, soit environ 55 000 T.

3.5.4.2.2.1.2. Conclusions

La structure mise en évidence par le levé magnétique plonge vers le SE. De dimensions décimétriques en direction et en pendage, sa puissance n'excède pas 10 m.

3.5.4.2.2.2. Carte de polarisation spontanée

La prospection par polarisation spontanée a été exécutée sur le même emplacement que le levé magnétique (Fig.140). Les valeurs de potentiel mesurées à partir d'une référence fixe varient rapidement dans l'espace. Cela entraîne que la représentation cartographique par traitement informatique est confuse (Fig.145). Afin de remédier à cet inconvénient nous avons effectué un lissage des équipotentielles.

La valeur et la signification de chaque point de mesure sont examinées en fonction de leur environnement. Les valeurs isolées fortes, négatives ou positives, sont très atténuées, la carte est terminée manuellement (Fig.146).

3.5.4.2.2.2.1. Observation de la carte simplifiée

Nous remarquons (Fig.146) :

- de fortes anomalies négatives (-800 mV à -1100 mV, régions A, B, C et D) ;
- l'intensité des phénomènes électriques est élevée ;
- les orientations préférentielles des équipotentiels sont N 55° et N 125 ° ;
- au regard de l'anomalie A, le corps conducteur a des dimensions décimétriques, de forme indéterminée. Il est cadré dans les orientations N 55° et N 125 ° ;
- l'évasement des équipotentiels de l'anomalie A vers le SE indique que le corps conducteur plonge vers le SE.
- l'intensité forte des effets en A, B, C et D est probablement provoquée par les schistes noirs graphiteux ou par de l'antracite.

3.5.4.4.4.4. Conclusions

La seule anomalie interprétable sur cette carte est A. Le corps conducteur décimétrique, penté légèrement vers le SE est composé d'une roche riche en anthracite.

3.5.4.2.2.3. Etude comparative magnétométrie et polarisation spontanée sur la zone I

Les corrélations entre les deux phénomènes physiques sont :

- les concentrations préférentielles des isogammes et des équipotentiels ;
- les pendages des corps magnétique et conducteur.

Les deux anomalies (anomalie A en polarisation spontanée et anomalie AB en magnétométrie) sont décalées de 100 m.

3.5.4.3. Zone II

3.5.4.3.1. Données géologiques (Fig.105)

Le site prospecté est une colline d'une cinquantaine de mètres de hauteur, au SE du Mont Chaz-Duraz. Cette colline semble être un énorme paquet de roche déplacé provenant du Mont Chaz-Duraz. Les roches, constituées essentiellement

de schistes noirs, sont très écrasées. A mi-pente de la colline, une couche mince de quartz blanc est interstratifiée dans les schistes noirs. Au pied et au S de la colline, dans la demi-lune formée par la route, les débris fins de quartz blanc masquent les affleurements.

Au Sud de la route quelques lentilles de conglomérat à galets de quartz noir, s'intercalent dans les schistes noirs. L'orientation de la schistosité est N 50° pentée de 40° vers le SE. Le contexte géologique de la zone II est comparable à celui de la mine de Promise.

3.5.4.3.2. Carte magnétique zone II

Il résulte de cette carte (Fig.147), deux orientations préférentielles, N 35° et N 130°. Les anomalies d'intensité faible et très locales, suivent l'orientation N 35°. Elles sont provoquées par des corps magnétiques de faible extension dont la nature pétrographique ne peut pas être précisée.

3.5.5. Données de susceptibilité magnétique (k) des roches

Six échantillons de roches ont été analysés sur poudre :

Echantillons	Nature	Provenance	k en u.é.m. CGS
CDR 1	quartz	Mont Chaz-Duraz	2×10^{-6}
CDR 5	quartz	Mont Belvédère	7×10^{-6}
CDR 6	grès	La Grande Tête	3×10^{-6}
62385 E	schiste	Terre Noire	2×10^{-6}
Haldes 1	tout-venant (pyrite)	Mine de Promise	15×10^{-6}
Haldes 2	" " " "	" " "	30×10^{-6}

Pour mémoire nous rappelons que le k de la magnétite est de l'ordre de 30×10^{-2} CGS et celui de la pyrrhotite est de $2,8 \times 10^{-2}$ CGS.

La susceptibilité magnétique des roches échantillonnées est faible. L'échantillonnage est trop ponctuel et insuffisant pour être significatif mais les valeurs indiquent que les roches de La Thuile sont peu magnétiques.

3.5.6. Prospection géochimique

3.5.6.1. Géochimie des stream sediments sur le plateau Chaz-Duraz

3.5.6.1.1. Cartes des anomalies (Planches 1a, b et c)

A partir d'une droite qui traverse le plateau, passant par le centre des planches et orientée NE-SW, nous dégagons deux régions géochimiques :

- la région NW contient deux anomalies probables Zn, deux probables Pb, une probable Ni et une probable Cr. Cette zone est également riche en Cu et Co. Th et V se remarquent mieux dans la région NW. D'une façon générale, les teneurs décroissent du SW au NE ;

- la région SE est dépourvue de valeurs remarquables.

Tableau des teneurs, Chaz-Duraz (ppm)

	b	b+2s
Zn	129	447
Pb	51	192
Cu	44	185
Ni	35	68
Cr	71	111
Co	16	37

3.5.6.1.2. Dendrogramme des corrélations positives

Les 20 éléments se répartissent en 4 grappes et 4 éléments indépendants (Fig.148) :

- Pb s'associe fortement à Zn. Pb-Zn se rattachent à la grappe Cr-Fe-Mg-V-K-Al-Be-Ti-Na par l'intermédiaire de leur corrélation avec Ni. Pb-Zn s'expriment donc par des sulfures. L'association Cu-Pb-Zn n'est pas évidente à la vue des corrélations (Fig.148 et 149) :

- Sr-Ca est l'association des roches calcaïques. Th se rattache à Sr-Ca par la corrélation avec Sr (0,60) ;

- Mg-Cr-Fe-K-Al expriment les minéraux phylliteux (micas). Ces minéraux semblent stocker V et une partie de Cr ;

- Cu est indépendant. Les corrélations avec d'autres éléments (Zn, Ni, Pb) sont faibles ($< 0,44$). Cu semble accompagner le groupe Zn, Ni, Pb (Fig.149). Il peut s'associer à une minéralisation sulfurée.

3.5.6.1.3. Conclusions

Les anomalies probables Pb et Zn suggèrent la présence de la galène et de la blende dans la zone I. Cu s'exprime sous la forme de chalcopryrite et Ni sous la forme de pentlandite et de pyrrhotite. Nous rappelons que la pyrrhotite peut être à l'origine des anomalies magnétiques. Une partie de Cr et Co exprimés dans le mispickel et la cobaltite, accompagnent la minéralisation sulfurée de Pb et de Zn.

L'étude géochimique des stream sediments met en valeur le même type de minéralisation que dans la mine de Promise.

Les cartes de stream sediments semblent indiquer la présence d'un corps minéralisé sulfuré (Cu, Co, Zn, Ni) dans la zone II. L'existence de pyrrhotite est également concevable (effets magnétiques de la zone II).

3.5.6.2. Géochimie des sols

Une prospection géochimique des sols a été utilisée sur le site de Promise (plateau Chaz-Duraz et Val Ruitor). 85 prélèvements de sol ont été analysés (Cu, Pb, Zn, Ag). Nous avons déterminé les éléments de l'analyse en fonction du contexte minier du gîte de Promise (blende, galène, argent, chalcopryrite). Les échantillons se répartissent de la manière suivante (Fig. 150 et 151):

- 29 échantillons au pied du mont Chaz-Duraz, dans la zone II ;
 - 25 échantillons dans le Val Ruitor, le long du torrent, en amont de la mine ;
 - 31 échantillons sur le versant W du Mont Colmet, au-dessus de la mine.
- Les prélèvements ont été réalisés à 30 cm de profondeur selon une maille de 20 m.

3.5.6.2.1. Chaz-Duraz (Fig. 150)

Tableau des teneurs en ppm.

	b	b+2s
Pb	72	357
Zn	2071	2288
Cu	45	163
Ag	2	4,8

L'échantillon n° 29 est composite (plusieurs prélèvements de sol dans des endroits contenant beaucoup d'hydroxyde de fer, au pied de la colline).

Echantillons (n°)	Anomalies
20	anomalie certaine Pb anomalie probable Zn forte teneur Pb et Zn ($x > b$)
21	forte teneur Pb et Zn ($x > b$)
22	forte teneur Cu ($x > b$)
29	anomalie probable Cu

L'analyse des échantillons 20, 21 et 22 situés au pied de la colline, révèlent la présence des sulfures de plomb et de zinc. Au NW de ces 3 points, à mi-pente de la colline, une couche mince de quartz blanc est interstratifiée dans les schistes noirs. Une relation entre cette minéralisation quartzreuse et les anomalies géochimiquement est envisageable.

3.5.6.2.2. Val Ruitor (Fig.151)

Sur le profil géochimique parallèle au torrent Ruitor, certains échantillons, en aval du profil, signalent de très fortes anomalies (Pb > 10 000 ppm, Zn > 5 000 ppm et Cu > 500 ppm). Le remblai des haldes de la mine de Promise, à cet endroit, est responsable de ces anomalies (pollution).

Sur le profil traversant la minéralisation sulfurée de la mine de Promise, nous ne notons pas d'anomalie. La masse importante d'éboulis gêne la prospection géochimique.

3.5.6.2.3. Conclusions

La géochimie des sols a révélé la présence de sulfures dans la zone II. Les anomalies détectées (Pb, Zn, Cu) par cette méthode peuvent être corrélées aux anomalies géochimiques des stream sediments et géophysiques (effets magnétiques faibles mais remarquables dans un champ ambiant calme) trouvées précédemment. Dans le Val Ruitor, la pollution liée à l'exploitation de la mine de Promise et le recouvrement important d'éboulis empêchent l'interprétation des résultats géochimiques. Néanmoins en dehors de ces domaines défavorables il serait possible d'étendre la prospection géochimique par sols sur le plateau Chaz-Duraz et plus difficilement (recouvrement important) sur le secteur Promise-Col de la Croix.

3.5.7. Critiques des méthodes

3.5.7.1. Polarisation spontanée

- Cette méthode ne semble pas très bien adaptée au terrain traversé. L'interprétation des résultats n'a pas permis de mettre en évidence une minéralisation sulfurée. Effectivement, la présence de graphite (plus ou moins systématique) soit dans la structure minéralisée, soit dans les roches encaissantes (gradient élevé) et la présence d'une fracturation régionale E-W (bien remarquée par polarisation spontanée) qui ne semble pas être associée à une minéralisation sulfurée, ont gêné l'interprétation des anomalies.

- La disposition des profils a favorisé l'étirement des champs d'anomalie. Une disposition régulière n'est malheureusement pas possible (terrain accidenté, recouvrement souvent important d'éboulis, de végétation et de neige. L'orientation de certains profils n'est pas perpendiculaire aux structures géologiques.

3.5.7.2. Magnétométrie

La magnétométrie mieux adaptée au terrain (champ magnétique terrestre stable) n'a pas été employée sur toute l'étendue de notre étude. Cette méthode est encore insuffisante : le magnétomètre à protons semble manquer de sensibilité (dans les secteurs de faible intensité au-dessus de la minéralisation de Promise). La méthode différentielle (Collin et al. 1973) devrait être utilisée (l'altération de la pyrrhotite diminue les effets et les effets sont inversement proportionnels au cube de la distance du point de mesure à la source magnétique).

3.5.7.3. Stream sediments et sols

Nous avons évoqué les problèmes de la représentativité d'un échantillon en prospection alluvionnaire par stream sediment (paragraphe 2.5., première partie). Elle est fonction du lieu de prélèvement (phénomène de dilution en aval des cours d'eau, influence de la topographie) du pH des eaux et de la granulométrie de la fraction analysée.

Dans cette étude préliminaire des alluvions, nous nous sommes contentés de réaliser les conditions générales de prospection sans approche méthodologique approfondie avec une densité de prélèvement dense : 10 échantillons au km². La dilution est négligeable sur le plateau de Chaz-Duraz et la topographie est relativement horizontale sans grande rupture de pente. Le pH des eaux n'a pas

été relevé. La granulométrie des fractions analysées est de 125 μm .

Une étude du pH des eaux et de la granulométrie est souhaitable dans le cadre d'une prospection régionale.

Les informations géochimiques recueillies sur le plateau Chaz-Duraz semblent répondre correctement à notre problème. Ceci est également vrai pour la géochimie des sols.

3.5.8. Conclusions

La prospection par polarisation spontanée a mis en évidence des champs d'anomalie susceptibles de contenir une minéralisation de même type que Promise et des champs, semble-t-il, stériles.

Les indices miniers (mine de Promise, galerie Saint-Eugène, Col de la Croix, indice de la Ruine) sont situés sur les marges des champs d'anomalie. La continuité géologique de la minéralisation de Promise semble fortement probable au SW du gisement (rive gauche du Val Ruitor ; conclusions positives en géophysique et en géochimie) et moins évidente au NE du gisement. Pour le confirmer, il serait préférable de compléter la prospection avec d'autres méthodes (magnétométrie et autres) entre Promise et le Col de la Croix.

La prospection magnétique a mis en évidence une structure linéaire orientée N 50° au SE des monts Belvédère et Chaz-Duraz dont les effets magnétiques sont élevés. La géométrie et la nature pétrographique (géochimie des stream sediments et des sols) semblent identiques à celles du gisement de Promise.

L'extension horizontale du gisement de Promise est probablement kilométrique (Col de la Croix - Mont Belvédère) soulignée par une succession discontinue de lentilles décimétriques de puissance de l'ordre du mètre.

Notre hypothèse de départ (la structure minéralisée suit une structure linéaire) semble être confirmée. Dans l'état actuel de nos connaissances nous ne pouvons pas estimer quantitativement la totalité de ce gisement.

Localement à l'Est du Mont Belvédère (zone I) une lentille de 55 000 tonnes de pyrrhotite plus ou moins massive, est sub affleurante (nous rappelons que la pyrrhotite est accompagnée de la blende, de la galène et d'autres sulfures dont nous ne connaissons pas les proportions).

3.5.9. Programme

Dans l'état actuel de cette étude, non exhaustive mais marquée par quelques conclusions positives, il serait tout à fait concevable d'engager une prospection par forages sur deux sites :

- à l'Est des monts Belvédère et Chaz-Duraz, en particulier sur la zone I (plateau Chaz-Duraz) ;
- en rive gauche du torrent Ruitor, à la hauteur des profils de polarisation spontanée n° 23 et 24 (en amont des anomalies électriques).

Les conditions sur ces sites sont :

- Val Ruitor :
 - . Accès véhicule de forage : route goudronnée ;
 - . Emplacement du forage : plate-forme horizontale existante ;
 - . Condition du forage : forage vertical dans des schistes écrasés, grès et conglomérat ;
 - . Profondeur d'investigation : la minéralisation se situerait entre 50 et 100 m de profondeur ;
 - . Alimentation en eau : torrent Ruitor à proximité.
- Plateau Chaz-Duraz :
 - . Accès véhicule de forage : chemin carrossable ;
 - . Emplacement du forage : plate-forme horizontale existante ;
 - . Condition du forage : forage vertical dans des schistes écrasés, grès et quartz ;
 - . Profondeur d'investigation : la minéralisation se situerait entre 20 et 40 m de profondeur ;
 - . Alimentation en eau : réseau hydrographique dense.

A partir des moyens de prospection que nous avons utilisés nous proposons :

- d'étendre la prospection par polarisation spontanée. Comme nous l'avons vu (paragraphe 3.5.3.2.2.1.), il existe probablement plusieurs niveaux parallèles susceptibles de contenir une minéralisation. La poursuite de cette étude s'orienterait au Nord et au Sud de la zone déjà prospectée (même au-delà des frontières) ;
- de refaire certains profils mal orientés (plateau Chaz-Duraz) ;

- de compléter l'étude magnétique (plateau Chaz-Duraz et secteur Promise-Col de la Croix) avec soit le magnétomètre à protons, soit un magnétomètre plus sensible (magnétomètre à double résonance nucléaire, GAMCIS CEN Grenoble).
- de compléter l'étude géochimique (stream sediments, sols et roches) avec le but de reconnaître la nature pétrographique des corps qui engendrent les anomalies géophysiques ainsi que les secteurs dont le potentiel métallogénique uranifère n'est pas négligeable. En effet, nous avons commencé une étude en 1979 au scintillomètre sur le plateau Chaz-Duraz. Les résultats, insuffisants, devraient être complétés (rapport d'activité Val d'Aoste 1979) ;
- d'utiliser d'autres méthodes géophysiques. Les conditions de recherche dans cette région sont délicates. La polarisation spontanée a donné des résultats globaux et la magnétométrie a donné des résultats précis mais trop restreints. L'emploi des méthodes de V.L.F. ou de polarisation induite complèteraient les études précédentes.

TROISIEME PARTIE : RESULTATS

CHAPITRE I

PROSPECTION GEOCHIMIQUE PAR PRELEVEMENTS DE ROCHES

Les amphibolites représentent la majorité des roches étudiées. Ces échantillons proviennent des schistes lustrés (zone de Zermatt-Saas-Fee) situés au Sud d'Aoste et l'échantillonnage a été effectué conjointement à celui des serpentinites et des magnétites de cette région.

Quelques métavolcanites (prasinites, chloritoschistes) et métasédiments (micaschistes, calcschistes et radiolarites) complètent l'échantillonnage.

1.1. LES AMPHIBOLITES

Le but de cette étude n'est pas pétrographique, mais plutôt de déterminer les caractères géochimiques des roches et éventuellement leur potentiel de minéralisation utile.

Pour cette raison nous décrirons brièvement les caractères minéralogiques et pétrographiques, avant d'aborder les aspects géochimique et prospectif.

1.1.1. Caractères minéralogiques (Photo 15 et 16)

Les amphibolites montrent des compositions minéralogiques très variées, en fonction de la nature de l'amphibole (hornblende, actinote et glaucophane) et du feldspath (albite et autres plagioclases) et de la présence de minéraux accessoires (pyrite, sphène, apatite, grenat). Certains caractères apparaissent :

- les actinolites, riches en chlorites sont localisées au contact entre les serpentinites et les roches basiques ;
- les glaucophanites sont très riches en grenats ;
- les amphibolites à hornblende sont le plus souvent pyriteuses ;
- le grenat est présent dans de nombreux échantillons ainsi que le sphène ;
- les épidotes sont omniprésentes.

1.1.2. Origine des amphibolites

Classiquement on admet que les amphibolites résultent de la transformation par recristallisation d'un matériel sédimentaire ou éruptif de composition appropriée (cas d'un métamorphisme topochemique). Le problème qui se pose est donc la reconnaissance du matériel initial (roche sédimentaire argilo-carbonatée ou roche ignée basique). Pour ceci, on dispose de plusieurs moyens utilisant la composition chimique de la roche.

Teneurs en TiO_2 , Cr et Ni

Une amphibolite est d'origine éruptive si sa teneur en TiO_2 est supérieure à 1 % et si les teneurs en Cr et Ni sont supérieures à 250 ppm (Evans B.W., Leake B.E., 1960).

La moyenne obtenue sur nos échantillons est de 2,06 % pour TiO_2 et de 468 ppm et 362 ppm pour Ni et Cr.

Le paramètre k de Niggli ($k = \frac{k_2O}{k_2O + Na_2O}$) est inférieur à 0,50 pour une amphibolite d'origine éruptive. Toutes les valeurs de k sont inférieures à 0,50 sur les amphibolites des schistes lustrés (ce calcul n'a été effectué que sur 12 échantillons, Na_2O n'ayant pas été dosé sur les autres).

Les amphibolites des schistes lustrés sont considérées comme des métavolcanites ; les quelques observations ci-dessus en confirment l'origine magmatique.

1.1.3. Caractères géochimiques

Afin de caractériser les associations géochimiques présentées par les amphibolites, nous avons eu recours aux techniques statistiques multivariées.

Ces résultats permettent l'interprétation des anomalies relevées dans les roches mais aussi sont utiles à l'interprétation des stream sediments.

L'étude statistique prend en compte les éléments et oxydes dosés et détectés sur tous les échantillons à savoir :

- Al_2O_3 , SiO_2 , MgO, TiO_2 , CaO, Fe_2O_3
- Cr, Ni, Cu, Co, Mn, V

1.1.3.1. Analyse statistique monovariable

Tableau des moyennes, écarts-types, variabilités géologiques :

Variable	Moyenne	Ecart - type	Variabilité géologique
Al_2O_3	15,9 %	4,8	0,30
CaO	10,8 %	6,5	0,59
Fe_2O_3	13,4 %	10,0	0,75
MgO	8,2 %	3,7	0,45
SiO_2	45,6 %	7,7	0,17
TiO_2	2,1 %	1,9	0,92
Mn	1 412 ppm	717	0,51
V	230 ppm	145	0,63
Ni	468 ppm	314	0,67
Cu	81 ppm	54	0,65
Cr	362 ppm	245	0,67
Co	47 ppm	41	0,84

Les valeurs obtenues sont en accord avec celles communément admises.

Toutefois deux éléments se distinguent par leur moyenne élevée : Fe_2O_3 et TiO_2 .

Variabilités classées par ordre croissant :

SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Mn	CaO	V	Cu	Ni	Cr	Fe ₂ O ₃	Co	TiO ₂
0,17	0,30	0,45	0,51	0,59	0,63	0,65	0,67	0,67	0,75	0,84	0,92

Ce classement sépare nettement les éléments majeurs constitutifs des minéraux principaux (Si, Al, Mg) des autres éléments. Parmi ces derniers, les plus variés sont le fer, le cobalt et le titane.

Fe₂O₃ et TiO₂ cumulent une variabilité et une moyenne élevée, ce qui suggère la présence d'échantillons enrichis.

1.1.3.2. Analyse statistique multivariée

1.1.3.2.1. Etude des corrélations. Dendrogrammes des corrélations positives (Tableau 10 a et Fig. 152).

Les 12 éléments se regroupent en trois grappes et quatre éléments indépendants.

- Des corrélations très fortes unissent le titane, le vanadium et le fer. Ce groupe caractérise le sphène qui est le minéral titanifère le plus répandu dans nos amphibolites. Ces sphènes paraissent enrichis en vanadium et en fer.
- La deuxième grappe regroupe Co et Cr, qui s'associent au pôle magnésien (amphiboles-chlorites).
- Le niveau de corrélation entre Ni et Si qui forment la dernière grappe montre que le nickel est en partie associé à un silicate. La position de Al semble indiquer qu'il s'agit d'un silicate alumineux.
- Les éléments indépendants :
 - . CaO est sans doute partagé entre plusieurs phases (dont le sphène) ;
 - . le cuivre est associé aux sulfures ;
 - . Mn est probablement présent dans plusieurs minéraux (grenats, amphiboles, micas).

1.1.3.2.2. Etude des facteurs (tableau 10b)

Communautés cumulées (5 facteurs) classées par ordre croissant :

Al ₂ O ₃	V	SiO ₂	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Cr	MgO	Cu	Mn	Co	CaO	Ni
0,87	0,87	0,86	0,84	0,84	0,81	0,81	0,76	0,74	0,73	0,69	0,63

Les dispersions des variables sont correctement décrites par les cinq premiers facteurs (communautés cumulées > 0,60).

- Description des facteurs

. Facteur 1 - Variance = 30,3 %

Le pôle "sphène" est très bien discriminé par l'axe 1 (communautés de Fe₂O₃, TiO₂ et V > 0,60). Il est opposé au chrome et au cobalt.

. Facteur 2 - Variance = 19,0 %

Il décrit le pôle alumino-silicaté auquel s'ajoute le nickel. Cette association suppose des échantillons dépourvus de sulfures auxquels s'associe en priorité le nickel dans les roches ignées. Le rayon ionique du nickel (R = 0,69 kX) permet des substitutions dans les minéraux avec Mg⁺⁺ (R = 0,66 kX) et Fe⁺⁺ (R = 0,74 kX). Ce phénomène a lieu dans nos roches dans les minéraux ferromagnésiens (chlorite, amphiboles). Ces dernières s'opposent sur l'axe 2 au manganèse et au calcium.

. Facteur 3 - Variance = 12,4 %

Les communautés des variables sont faibles avec ce facteur qui décrit partiellement le cobalt, le nickel, le cuivre et le fer et les oppose à l'alumine et au calcium.

. Facteur 4 - Variance = 8,6 %

Il décrit le pôle de différenciation magnésien qui regroupe MgO et Al₂O₃ et souligne le comportement indépendant du manganèse.

. Facteur 5 - Variance = 8,5 %

C'est le facteur le plus significatif pour le cuivre et le nickel mais le niveau de variance est faible, montrant qu'il s'agit d'un phénomène mineur.

- Plans factoriels les plus discriminants

Variable	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	V	Si	Cr	Co
Plan factoriel	<u>1.3</u>	<u>1.2</u>	<u>1.4</u>	<u>2.4</u>	1.3	1.3
Communauté cumulée avec le plan factoriel	0,82	0,77	0,76	0,75	0,74	0,60

Variable	MgO	Cu	Mn	Ni	CaO
Plan factoriel	4.1	5.3	2.4	5.2	1.2
Communauté cumulée avec le plan factoriel	0,55	0,54	0,53	0,49	0,44

Cinq variables (MgO, Cu, Mn, Ni, CaO) sont imparfaitement décrites en ne considérant que deux facteurs. Une bonne compréhension des dispersions de ces variables nécessite l'examen de plusieurs plans factoriels.

1.1.3.2.3. Projection des variables sur les plans des facteurs

- Plan des facteurs 1 et 2 (Fig. 153)

Quatre pôles de différenciation apparaissent sur ce diagramme :

- . Le pôle du sphène qui associe très étroitement sur l'axe 1, le fer, le vanadium et le titane. Cette association est parfaitement discriminée, ce qui traduit le chimisme constant de ce minéral ;
- . le regroupement Cr - Co paraît se localiser dans les minéraux magnésiens et calciques. Ces derniers sont probablement les amphiboles dans lesquelles Cr^{+++} (rayon ionique = 0,64 kX) remplacent Fe^{+++} (0,67 kX), (des hornblendes communes peuvent contenir 1 400 ppm de chrome, Rankama et Sahama, 1949). Ce pôle "amphibole" s'oppose au précédent ;
- . l'axe 2 décrit le pôle alumino-silicaté. La proximité du nickel indique le caractère ferro-magnésien de cette association qui représente sans doute les chlorites ;
- . le manganèse ne dépend pas des autres variables.

- Plan des facteurs 1 et 3 (Fig. 154)

L'utilisation de l'axe 1 implique l'opposition entre les pôles titanifères et magnésiens. Ces derniers sont identiques à ceux décrits par la projection précédente :

- . Mg - Cr - Co
- . Fe - V - Ti

Le calcium est isolé et séparé du magnésium, traduisant ainsi la présence de la calcite. Ce minéral est dépourvu d'éléments en traces.

Nous avons souligné précédemment les faibles valeurs des communautés sur l'axe 3, ce qui ne permet de décrire qu'imparfaitement le cuivre (sulfures?).

- Plan des facteurs 2 et 3 (Fig. 155)

Ce diagramme confirme la présence du cobalt et du chrome dans les minéraux ferromagnésiens ainsi que l'association nickel-silice.

- Bilan de l'étude statistique

Il apparaît, du fait de la minéralogie complexe des amphibolites et de l'hétérogénéité de l'échantillonnage, que le comportement des éléments est fonction de plusieurs phénomènes. Ainsi, Fe est associé aux minéraux titanifères, mais aussi aux silicates magnésiens et aux sulfures ; cette ubiquité détermine la répartition des éléments en traces qui obéit néanmoins aux caractères suivants :

- . le chrome et le cobalt sont localisés préférentiellement dans les minéraux ferro-magnésiens (amphiboles) ;
- . le nickel est associé aux silicates alumineux (chlorites), en l'absence de sulfures ;
- . ces derniers sont représentés par le cuivre (facteur 5) ;
- . le manganèse est globalement indépendant, du fait de son comportement complexe ;
- . la calcite est dépourvue d'éléments en traces ;
- . le vanadium est localisé dans les minéraux titanifères.

1.1.3.3. Anomalies géochimiques

Des analyses par activation neutronique sur cinq amphibolites ont permis la détermination des éléments suivants :

As, W, Au, La, Ce, Lu, Eu, Ir, Os, Tb.

De plus, l'or a été dosé sur 10 échantillons supplémentaires.

Les résultats les plus intéressants sont obtenus pour le tungstène, l'iridium et l'or.

- Le tungstène

Il est décelé dans deux échantillons :

- G 30 a (vallond'Urtier ; hornblende, plagioclase, sphène, pyrite) : 3 ppm ;
- L G₂ (Lac Gelé ; amphiboles bleues et vertes et grenats millimétriques) : 12 ppm.

La comparaison avec la teneur de fond dans les roches basiques (1 ppm d'après Taylor, 1966) montre que les amphiboles sont localement enrichies en tungstène. Ce fait est à rapprocher de la présence très fréquente de scheelite dans les concentrés alluvionnaires.

- L'iridium

Teneur de fond dans les roches basiques : 1 ppb (Rankama et Sahama, 1949) ;
0,67 ppb (Ehmann et al. 1970).

Les analyses révèlent une teneur très importante de 200 ppb dans l'échantillon LG2 ; les autres valeurs obtenues sont 7, 5 et 1 ppb.

Ces données, bien qu'en nombre réduit, montrent que les amphibolites sont susceptibles de représenter une source de minéralisations en platinoïdes.

Pour tenter de définir si l'échantillon LG2 est lié à un chimisme particulier, nous pouvons étudier sa position sur les différentes projections vectorielles.

Communautés de LG2 avec les cinq premiers facteurs

Communauté	0,177	0,011	0,007	0,494	0,276
Facteur	1	2	3	4	5

Le plan factoriel le plus discriminant est déterminé par les axes 4 et 5 qui sont deux facteurs significatifs pour MgO, Cu, Mn et Ni ; le facteur 1 est également significatif.

Sur ce dernier facteur, LG2 est associé au pôle titanifère (Fe - V - Ti) et sur les axes 4 et 5 au manganèse et au nickel. Ce dernier point est important car les platinoïdes sont en général fortement corrélés au nickel (Naldrett, 1976).

Cet échantillon présente effectivement une teneur en nickel assez élevée (671 ppm).

Le nickel serait-il, dans certains cas, un indicateur des platinoïdes ? Pour conclure, il est nécessaire de rappeler les propriétés géochimiques de ces derniers :

A l'instar des terres rares, les platinoïdes forment un groupe géochimique cohérent ; du fait des volumes atomiques très proches on peut parler du platine et de ses "compagnons".

On distingue deux groupes en fonction de leur position dans la classification périodique :

- les platinoïdes légers : ruthénium, rhodium, palladium
- les platinoïdes lourds : osmium, iridium, platine.

La règle de Oddo et Harkins s'applique aux platinoïdes, c'est-à-dire que les éléments à numéro impair (Rh et Ir) sont moins abondants.

Ils sont très fortement sidérophiles. Leur clarke est très faible. Dans la croûte terrestre ils montrent des comportements différents : le palladium et le platine montre un comportement chalcophile très net par rapport à l'iridium, l'osmium, le ruthénium et le rhodium ; ces derniers sont généralement concentrés dans les minéraux produits lors des premiers stades de la cristallisation (chromite).

En conséquence, les minéralisations platinifères se localisent dans les sulfures (surtout nickélifères) et les chromites.

La présence de chromite dans l'échantillon LG2 est impossible du fait de la nature amphibolitique de la roche et de sa teneur très faible en chrome. De même, l'absence de cuivre et de cobalt rend douteuse l'existence de sulfures. De plus, l'échantillon ne présente pas de sulfures visibles à l'œil nu. Il semblerait que l'origine de cette anomalie est à rechercher dans les roches ultramafiques situées à proximité (serpentinites). Mais le problème de la détermination du phénomène responsable de la mobilisation des platinoïdes se pose.

Rucklidge (1971) a mis en évidence le rôle de la serpentinisation dans la migration du nickel à partir des silicates vers les sulfures et il propose un mécanisme identique pour les platinoïdes. Ce mécanisme est invoqué par Häkli et al. (1976) dans la genèse des gisements platinifères du massif de serpentinites d'Hitura (Finlande) : la teneur en platine des serpentinites est en moyenne de 14 ppb dans les serpentinites et elle atteint plus de 1 000 ppb dans les zones sulfurées situées à la périphérie du massif. En dehors de ces zones, caractérisées par une tectonique tardive intense et par la présence de roches très chloriteuses, les sulfures sont totalement dépourvus de platinoïdes. La mobilisation des platinoïdes, inclus dans les structures des forstérites et des spinelles chromifères lors des premiers stades de la cristallisation, s'effectue au cours de la serpentinisation sous l'influence de solutions riches en éléments volatils (As, Sb, Bi, Te, Cl). Les platinoïdes se redéposent sous la forme de minéraux indépendants associés aux sulfures (sperrylite, irarsite, hollingworthite, michenerite).

Le peu de données dont nous disposons ne permet pas d'établir une relation quelconque entre les platinoïdes et les amphibolites. Toutefois, la teneur obtenue sur l'échantillon LG2 est un reflet du potentiel de ces roches en platine.

- L'or

La teneur moyenne est de 7 ppb ce qui est normal dans les amphibolites.

Trois anomalies sont relevées :

- . échantillon L28 (Bellecombe) : 24 ppb ;
- . échantillon G11a (Lac Ponton) : 20 ppb ;
- . échantillon G63 (Bec Curbo) : 23 ppb.

- Autres éléments

Les terres rares.

Les profils obtenus sur les amphibolites sont variées ; schématiquement on a deux types d'amphibolites (Fig.156).

- . les unes riches en terres rares légères (ou cériques) ;
- . les autres riches en terres rares lourdes (ou yttriques).

Dans les roches basiques, la somme des terres rares varie de 74 à 174 ppm (Le Suavé, 1974) ; il semble que, malgré les profils incomplets dont nous disposons (La, Ce, Tb, Lu, Eu), nos amphibolites correspondent à cette moyenne.

1.2. LES SERPENTINITES

Les caractères minéralogiques et chimiques des serpentinites sont décrits dans le chapitre II de la deuxième partie de ce mémoire.

Nous ne considérerons ici que les anomalies et abondances des autres éléments dosés par activation neutronique.

1.2.1. Les platinoïdes (iridium et osmium)

Les abondances dans les roches ultrabasiques sont en moyenne de quelques ppb (2,1 ppb pour l'iridium, 6,7 ppb pour l'osmium d'après Crocket et Chyi, 1972).

Trois échantillons de la mine de Cogne montrent un enrichissement important :

- deux serpentinites (2 214 MC9, G33a) : 90 et 80 ppb ;
- un échantillon de minerai (2 259 MC6) : 80 ppb.

Les communautés, sur les axes principaux, de ces trois roches sont les suivantes :

Facteur	1	2	3	4	5
G 33a	0,72	0,21	0,00	0,00	0,00
2 214 MC9	0,53	0,23	0,00	0,00	0,01
2 259 MC6	0,65	0,03	0,00	0,12	0,14

Deux facteurs (1 et 2) suffisent à décrire les échantillons de serpentinites. Sur le plan défini par ces facteurs, ils se situent à l'extrémité N-E du nuage englobant les serpentinites de Cogne (Fig.157). Ce pôle caractérise l'enrichissement en nickel et en chrome et l'on note que ces deux échantillons présentent les teneurs les plus élevées en nickel (2 449 et 3 397 ppm).

L'échantillon de magnétite est discriminé par les axes 1 et 5. La communauté significative sur l'axe 5 s'explique par la teneur anormale observée pour le cuivre (280 ppm). Les trois autres échantillons de magnétite dans lesquels l'iridium n'a pas été décelé montrent des teneurs en cuivre très faibles (< 5 ppm).

Ces observations, en nombre insuffisant pour comprendre le comportement géochimique de l'iridium, suggèrent cependant qu'il n'est pas lié à la magnétite, mais qu'il résulte plutôt de phénomènes de mobilisation (liaison avec les sulfures ?).

Néanmoins, les valeurs obtenues sur les deux serpentinites sont très significatives de leur abondance en platinoïdes.

En effet, les teneurs moyennes sont généralement très faibles dans ces roches.

Tableau des abondances de l'iridium dans différents massifs ultramafiques :

Provenance	Teneur	Source
Chypre	0,01 - 6 ppb	L.H. Ahrens (1954)
Mont-Albert (Québec)	2,1 ± 1,1 ppb	J.H. Crocket et L.J. Chyi (1972)
Oural	5,7 ppb	V.G. Fominykh (1970)
Hitura (Finlande)	14 ppb	T.A. Häkli et al (1976)

A.I. Naldrett et L.J. Cabri (1976) montrent la stabilité remarquable du rapport

$\frac{Pt}{Pt + Ir + Os}$ dans les roches basiques et ultrabasiques. Il est en moyenne de $0,92 \pm 0,055$ (maximum = 0,98, minimum = 0,79). Cette valeur implique une teneur en platine toujours très supérieure à la somme de l'iridium et de l'osmium.

L'osmium n'a pas été décelé dans les échantillons de Cogne (limite de détection trop élevée) ; cependant nous pouvons estimer qu'il peut varier de 20 à 100 ppb (d'après les valeurs extrêmes du rapport $\frac{Ir}{Os}$ dans les roches).

Le calcul indique pour le platine des valeurs comprises :

- entre 990 et 1 710 ppb pour 633a, soit 1,7 g/t
 - entre 900 et 1 620 ppb pour 2 214 MC9, soit 1,6 g/t
- en prenant pour valeur de $\frac{Pt}{Pt + Ir + Os} = 0,90$.

Le cas le moins favorable (pas d'osmium et un rapport de 0,7) donne pour Pt une valeur de 630 ppb, soit 0,63 g/t.

Ces considérations montrent l'intérêt très grand des serpentinites en tant que source potentielle de platinoïdes si l'on considère que la teneur limite d'exploitation est de l'ordre de 5 g/t environ pour le platine.

1.2.2. Les terres rares

Les profils de répartition des terres rares dans sept échantillons de la mine de Cogne (deux serpentinites et cinq minerais) sont de deux types : (Fig. 158 et 159)

- type A où le cérium et le terbium forment des pics (2 serpentinites, 2 magnétites) ;
- type B où le cérium et le terbium forment des creux (4 magnétites).

Dans les roches ultrabasiques, la teneur de fond est pour la somme des 14 terres rares d'environ 25 ppm (Le Suavé, 1974). Si cela semble se vérifier pour les serpentinites et les magnétites du type B, par contre il est évident que les magnétites du type A sont anormalement riches, puisque Ce représente à lui seul 140 ppm. Nous avons précédemment noté que trois échantillons de Cogne étaient très riches en iridium.

Ils présentent le même type de profil (A), ce qui n'exclut pas une liaison entre les concentrations en platinoïdes et le cérium, témoin, on le sait, de conditions oxydantes élevées lors de la formation du minerai.

1.2.3. L'or, le tungstène, l'arsenic

Aucune valeur remarquable n'est relevée pour ces trois éléments. La moyenne est de 2,5 ppb pour Au ; As et W ne sont décelés que dans un échantillon (2 ppm).

1.3. AUTRES ROCHES

1.3.1. Les micaschistes

Deux éléments rares présentent des teneurs élevées pour de telles roches.

L'or : trois échantillons (G 18a, G 23a, G 85), dont deux proviennent de la région de la Pointe Noire, contiennent respectivement 22, 27 et 70 ppb.

L'origine de cette minéralisation est sans aucun doute à rechercher dans les serpentinites avoisinantes, car des teneurs aussi fortes dans un micaschiste impliquent une contamination importante.

Cette remarque est applicable à l'échantillon G 18a pour expliquer sa teneur anormale en iridium (5 ppb).

1.3.2. Mine de Petit-Monde (Valtournanche)

Ce gisement, décrit dans le chapitre 1 de la deuxième partie est constitué de pyrite cuprifère et se trouve associé aux métavolcanites de la zone de Zermatt - Saas-Fee.

Six échantillons (3 minerais, 3 prasinites amphiboliques) ont été analysés ; les résultats montrent des teneurs intéressantes dans le minerai :

- en iridium : 250 et 30 ppb ;
- en argent : 16 ppm ;
- en or : 100 ppb, 30 ppb ;
- en tungstène : 25 ppm.

L'encaissant est dépourvu de ces métaux. Il semble probable que l'association sulfures-métaux rares est très forte et qu'elle traduit une origine commune ou une mobilisation importante à partir des roches ultrabasiques associées.

1.4. CONCLUSIONS

L'inventaire des anomalies relevées dans les différents types de roches met en évidence l'intérêt présenté par les platinoïdes.

Des anomalies en iridium sont constatées dans quatre faciès pétrographiques :

- les serpentinites de Cogne : 90 et 80 ppb,
- la magnétite de Cogne : 80 ppb,
- une amphibolite de la région du Lac Gelé : 200 ppb,
- un minerai en pyrite cuivreuse de la mine de Petit-Monde : 250 ppb.

L'origine des platinoïdes est à rechercher dans les serpentinites, mais les fortes teneurs observées dans les roches situées au contact des serpentinites (amphibolites) et dans les minéralisations liées aux métavolcanites (Petit Monde), sont l'indice de phénomènes de mobilisation importants. Nos données ne permettent pas de savoir par quelle voie et par quel moyen les platinoïdes se sont concentrés dans certaines roches; cependant quelques remarques peuvent être faites :

- La serpentinitisation est, en présence de solutions riches en éléments volatils (Cl, As, Te, Bi, S), un facteur très important de mobilisation et de concentration.
- Les concentrations éventuelles sont à rechercher dans les roches situées au contact des serpentinites, de préférence dans des zones riches en sulfures et en chlorites.
- Dans les serpentinites, l'iridium montre une concentration dans les échantillons les plus riches en nickel.
- L'anomalie en iridium dans le minerai de Cogne est associée à une anomalie en cuivre et en cérium.

CHAPITRE II

PROSPECTION GEOCHIMIQUE PAR STREAM SEDIMENTS

Les campagnes de terrain ont permis la récolte et l'analyse de 310 échantillons. Les régions prospectées, réparties sur tout le territoire du Val d'Aoste, présentent des caractères géologiques différents, ce qui nous a amené à considérer des sous-populations pour le calcul des paramètres statistiques (teneur de fond et seuil d'anomalie).

Ces sous-populations représentent en général une vallée (ex. : Val d'Ayas, Val Ferret), mais parfois il a été possible de réunir les données de plusieurs vallées situées dans les mêmes conditions géologiques lorsque les paramètres calculés sur chaque vallée étaient peu différents (cas des vallées de Grauson, Saint-Marcel, Grand Eyvia dans les schistes lustrés).

2.1. TRAITEMENT DES DONNEES - PRESENTATION DES RESULTATS

Le tableau 11 des teneurs de fond et des seuils d'anomalies présenté dans l'annexe a été établi à l'aide de la méthode graphique exposée au chapitre II de la première partie. Cette étude concerne les éléments Ni, Cr, Co, Pb, Zn, Cu, Be, Sr, V et Th ; les éléments Ag, Cd et Mo trop rarement détectés dans les analyses ne sont pas étudiés ici.

Les résultats sont rendus sous la forme de cartes d'anomalies qui permettent la visualisation des associations d'éléments et des anomalies. Des cartes géologiques schématiques indispensables à l'interprétation sont jointes à ces documents. Le nombre important d'échantillons et de variables a rendu nécessaire l'emploi de méthodes statistiques multivariées pour étudier les associations d'éléments.

Les cartes de répartition des éléments sont établies en fonction de la légende suivante :

- $x \leq b$
- ⊙ $b < x \leq b + s$
- $b + s < x \leq b + 2s$
- $b + 2s < x \leq b + 3s$
- $x > b + 3s$

x = teneur de l'échantillon

b = background = teneur de fond

s = standard deviation = écart-type.

2.2. TRAITEMENT STATISTIQUE MULTIVARIABLE (ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES)

Cette étude a été effectuée dans le but de connaître les associations d'éléments existant dans les stream sediments. Ces résultats facilitent les interprétations des cartes d'anomalies.

La population étudiée regroupe les 310 échantillons de stream sediments et nous avons considéré les 20 éléments et oxydes suivants :

- Al_2O_3 , K_2O , Na_2O , P_2O_5 , MgO , TiO_2 , MnO_2 , CaO , Fe_2O_3 , Cr, Ni, Co, Zr, Sr, V, Pb, Zn, Cu, Be, Th.

2.2.1. Statistiques monovariées (Tableau 12)

Variabilités géologiques classées par ordre croissant :

Al	Na	Fe	Be	Sr	Zr	V	K	Mn	Zn	P	Ca	Co	Th	Mg
0,19	0,35	0,36	0,42	0,44	0,45	0,49	0,49	0,50	0,58	0,59	0,70	0,70	0,78	0,90

Pb	Cr	Ni	Ti	Cu
1,06	1,08	1,2	1,3	3,0

Ce classement permet de définir 3 groupes d'éléments :

- éléments variant faiblement : Al, Na, Fe, Be, Sr, Zr, V, K,
- éléments variant modérément : Mn, Zn, P, Ca, Co, Th, Mg,
- éléments variant fortement : Pb, Cr, Ni, Ti, Cu.

Les zones étudiées montrent des caractères géologiques très variables (ophiolites, roches sédimentaires métamorphiques ou roches cristallines acides) ; il semble donc normal que le tableau des variabilités géologiques dans les stream sediments soit le reflet des dispersions primaires des éléments dans les roches. En effet, les éléments dont les abondances dans les différents types de roches varient fortement (par exemple : Ni et Cr) montrent une variabilité géologique très forte dans les stream sediments. A l'inverse, les éléments variant peu dans les roches (par exemple : Be, Sr, Zr) se comportent de la même façon dans les stream sediments.

La variabilité très forte du cuivre est due à la présence de stream sediments très riches en cuivre, ces échantillons provenant de la région d'Hérin (Mine de cuivre).

2.2.2. Interprétation de la matrice de corrélation. Etude du dendrogramme des corrélations positives (Fig. 160 et Tableaux 13a et b).

Les 20 éléments considérés sont regroupés en quatre grappes et cinq éléments indépendants.

- Les éléments Mg, Ni et Cr sont très étroitement associés : ils caractérisent les roches ultrabasiques (serpentinites). Ni et Cr sont les éléments en traces typiques des roches magnésiennes. Co, V, Fe, Cu, Mn sont rattachés à cette "grappe ultrabasique" mais le niveau de corrélation (0,5 à 0,6) pourrait indiquer un comportement différent : ces éléments sont plus probablement associés aux roches basiques ; le rattachement à la grappe ultrabasique s'expliquant par l'étroite association existant sur le terrain entre les serpentinites et les amphibolites.
De plus, les éléments tels Co, Fe, V sont susceptibles d'appartenir aux roches ultrabasiques et basiques.
- Les trois autres associations semblent indépendantes de l'ensemble basique-ultrabasique :
Sr est fortement corrélié à Ca ; Sr est susceptible de remplacer Ca (les rayons ioniques sont respectivement de 1,27 KX et 1,06 KX) et cette association caractérise les roches calciques sédimentaires (calschistes, calcaires).
- La corrélation très forte (0,86) entre Be et K est sans doute le reflet de la richesse en Be des micas. En effet, Be peut se substituer à Si lorsqu'il se trouve à des teneurs insuffisantes pour former des minéraux indépendants. Th se rattache à cette grappe que l'on peut qualifier d'acide.
- La grappe Pb-Zn (corrélation = 0,74) semble aussi se limiter aux régions à caractère géologique acide comme le montre leur tendance à s'associer à la grappe K-Be-Th.
- L'indépendance des éléments P, Na, Zr, Ti, Al peut s'expliquer par l'existence systématique, dans toutes les formations, de minéraux tels l'apatite ou le zircon, ou par le comportement ubiquiste des éléments tels Al ou Na susceptibles d'exister dans de très nombreux minéraux.

2.2.3. Description des facteurs

Facteur 1. Variance = 31,8 %.

Il discrimine parfaitement les éléments Mg, Cr, Ni, Co, Fe, V et les oppose à Be, K, Th. Cet axe met en opposition les "éléments basiques et ultrabasiques" et les "éléments acides".

Les communautés très fortes de Mg, Cr, Ni, Co, K, Be, Th ($> 0,55$) montrent que les distributions de ces éléments sont parfaitement décrites par l'opposition acide-basique.

Facteur 2 : Variance = 13,01 %.

Aucune communauté n'est supérieure à 0,60 sur ce facteur. Il souligne l'association Sr-Ca qui s'oppose à Pb, Zn et Al.

Facteur 3 : Variance = 9,7 %.

Il indique le comportement indépendant de P (apatite) et d'une partie de Sr non lié à Ca.

Facteur 4 et 5 : Variance = 9,2 % et 7,3 %.

Le poids de variance de ces facteurs est faible : ils permettent de décrire les comportements indépendants de Na, Ti et Zr.

Remarques résultant de l'étude des grappes et des facteurs :

Ces études ont permis de mettre en évidence :

- l'association étroite entre Mg et Cr-Ni-(Co);
- l'association Pb-Zn;
- l'association K-Be,Th;
- l'association Sr-Ca;
- l'indépendance de Al, P, Na, Zr, Ti;
- le comportement complexe de Mn, Cu, V et Fe.

Nous pouvons noter que de nombreuses traces suivent un élément majeur, ce qui signifie que ces traces sont présentes en substitution dans des minéraux (par exemple: Sr-Ca) ou que les minerais existants sont associés à des types pétrographiques très particuliers.

2.2.4. Projection sur les plans des facteurs

. Plan des facteurs 1 et 2 (Fig. 161)

Cette projection visualise parfaitement les associations décrites pour l'étude des corrélations et des facteurs :

- Mg, Ni, Cr, Co, Fe, V et Mn représentent les associations à caractère ultra-basique et basique ;
- Ca et Sr sont associés, caractéristiques des roches sédimentaires ;
- Be, K et Th représentent le pôle "acide";
- Pb et Zn caractérisent les sulfures des zones "acides".

. Plan des facteurs 1 et 3.(Fig. 162)

Ce plan factoriel fait apparaître P qui ne s'associe à aucune autre élément, ce qui souligne le caractère indépendant de cet élément.

Nous retrouvons les associations précédemment décrites : Mg, Ni, Cr et Be, K, Th (pôles ultrabasique et acide).

Fe est lié à Co. Ces deux éléments possèdent des rayons ioniques très proches (0,83 KX et 0,82 KX). Cette association peut se concevoir dans des minéraux ferromagnésiens ou dans des sulfures (la proximité de l'élément Cu laisse supposer qu'il s'agit de sulfures).

L'élément associé le plus étroitement à Ca n'est plus Sr mais V. Cette association V-Ca avait déjà été remarquée dans les serpentinites.

. Plan des facteurs 2 et 3 (Fig. 163)

Seuls deux éléments (Sr et Ca) sont bien discriminés sur ce plan (communautés supérieures à 0,50). Les autres éléments doivent être étudiés sur d'autres projections.

Nous avons remarqué que les facteurs 4 et 5 permettraient de décrire les éléments "indépendants" Al, Na, Ti, Zr : les projections faisant intervenir l'un de ces facteurs ne sont pas reproduites ici ; le plan des facteurs 4 et 5 décrit le comportement d'une partie de Co qui s'associe à l'ensemble Pb-Zn (sulfures) et regroupent les éléments Na, Ti et Zr.

La corrélation Na-Ti pourrait refléter la minéralogie des amphibolites (albite, sphène, apatite).

2.3. INTERPRETATION DES CARTES DE REPARTITION DES ELEMENTS

Les différentes vallées prospectées seront considérées successivement dans ce chapitre. Pour chaque vallée seront discutées les associations d'éléments, leurs répartitions ainsi que les anomalies constatées et leur interprétation.

2.3.1. Vallées de Saint-Marcel, Grauson et Grand Eyvia

Les échantillons de ces trois vallons ont été regroupés pour les calculs statistiques, ces trois vallées présentant les mêmes conditions géologiques.

Variabilités géologiques des éléments en traces classées par ordre croissant.

Sr	Be	V	Th	P	Mn	Ti	Zn	Co	Zr	Pb	Cr	Cu	Ni
0,16	0,17	0,17	0,20	0,20	0,26	0,26	0,26	0,38	0,47	0,65	0,74	0,75	0,77

Ce classement met en évidence la distribution homogène de la plupart des éléments Pb, Cr, Cu et Ni, éléments variant le plus fortement, paraissent les plus susceptibles de présenter des anomalies intéressantes.

Association d'éléments (Fig. 164 et Tableau 14).

Les 14 éléments se regroupent en trois grappes et trois éléments isolés.

La grappe Pb-Zn-Cu est représentative des sulfures existant dans les roches basiques (amphibolites, prasinites) de cette région. Le rattachement de Mn à cette grappe est difficile à expliquer : la pyrite est en général dépourvue de manganèse bien que le remplacement $Mn^{2+} Fe^{2+}$ soit possible. Mn, est plus probablement associé aux minéraux ferromagnésiens des amphibolites (substitution de Mg et Fe dans les hornblendes).

La grappe Cr-Ni-Co est typique des roches ultrabasiques (serpentinites). La forte corrélation Zr-Co (+ 0,58) qui rattache Zr à ce groupe "ultrabasique" ne semble pas avoir de raison : Zr se trouve à des teneurs faibles dans ces roches et pourrait se trouver incorporer dans les minéraux fémiques.

Ti et P forment un couple d'éléments cohérents malgré leur grande différence de comportement chimique. Cette association est le reflet de la présence de minéraux titanifères (apatite, sphène) dans les roches basiques. V sous forme d'un quadrivalent, peut se substituer à Ti^{4+} dans ces minéraux (Rankama, 1949).

Les éléments isolés (Be, Th) sont des éléments présents à de faibles teneurs dans les roches de cette région. Ces éléments sont concentrés dans les roches acides et pour cette raison ne sont pas corrélés aux autres éléments.

Sr est lié au Ca dans les métasédiments.

2.3.1.1. Vallon de Saint-Marcel (Planches 2 a, b, c et d).

- Contexte géologique : La zone prospectée est située dans les schistes lustrés et ophiolites de la zone de Zermatt-Saas Fee. Les faciès rencontrés sont des calcschistes, des micaschistes, des prasinites, des amphibolites et des serpentinites.

- Nombre de prélèvements : 14.

- Indices miniers : Prabornaz (Mn)

Servette-Chuc (Cu)

- Répartition des éléments :

Deux associations d'éléments ressortent de l'étude des cartes d'anomalies :

- . Cr-Ni-Co,
- . Pb-Zn-Cu.

Ces deux groupes, mis en évidence par l'étude des corrélations reflètent respectivement les caractères géochimiques des serpentinites et des amphibolites.

Nous pouvons corréler l'ensemble Pb-Zn-Cu aux sulfures (pyrite) que l'on observe fréquemment dans les amphibolites des schistes lustrés.

Ni, Cr et Co sont les éléments en traces caractéristiques des serpentinites à magnétite. Mn ne présente pas une répartition proche de celle de Pb, Zn et Cu, comme pouvait le laisser supposer l'étude des corrélations. Ce fait peut être rapproché de l'existence dans cette région de minéralisations manganésifères dépourvues de sulfures (Mn est lié à des métasédiments quartzitiques).

- Anomalies

Il existe une zone anormale en Pb- Zn- Cu au Sud du vallon. Les valeurs brutes (291 ppm et 206 ppm de Cu, 224 ppm de Zn, 45 ppm de Pb) sont intéressantes. De plus, la richesse cuprifère de cette région est connue (indices des vallons de Saint-Marcel et de Clavalite) mais néanmoins l'existence d'une zone minéralisée au Sud du vallon est douteuse car ces anomalies pourraient résulter d'un "effet de palier" : en effet la zone anormale correspond topographiquement au premier replat traversé par les ruisseaux. Cette rupture de pente a pu favoriser la concentration des minéraux lourds, créant ainsi une anomalie indépendante d'une minéralisation.

L'anomalie ponctuelle en Ni est liée à la proximité d'un affleurement de serpentinites.

L'indice manganésifère de Prabornaz n'est pas décelé par les stream sediments ; il semble que Mn ne soit pas un élément utilisable en prospection géochimique par stream sediments dans l'état actuel de nos recherches.

2.3.1.2. Haut-Vallon du Grand Eyvia (Planches 3 a, b et c).

- Contexte géologique : Schistes lustrés à ophiolites (zone de Zermatt-Saas-Fee) ;
- Nombre de prélèvements : 18.

- Indices miniers : aucun.

- Répartition des éléments :

Les associations observées (Cr-Ni-Co et Pb-Zn-Cu) sont les mêmes que celles relevées dans le vallon de Saint-Marcel et que celles déduites de l'étude des corrélations.

Les commentaires concernant ces associations ne diffèrent pas de ceux concernant le vallon de Saint-Marcel.

- Anomalies :

Le secteur situé au pied de la Pointe Noire constitue une zone anormale en Cr, Ni et Co.

De ces trois éléments, Cr semble le plus intéressant, les teneurs brutes étant supérieures à 1 000 ppm.

Comme le laissait prévoir la corrélation Mg-Ni-Cr établie par l'étude statistique multivariable, ces échantillons présentent des teneurs élevées en Mg. Ces caractères suggèrent l'existence de minéraux plus magnésiens que les serpentines (forsterite, enstatite).

Les valeurs élevées en Cr ne résultent pas simplement de la présence de roches ultrabasiqes mais indiquent la possibilité d'existence de minéralisations chromifères (chromite). En effet les analyses de roches (amphibolites, métagabbros) provenant de la Pointe Noire ne montre pas un enrichissement particulier en Cr, cette zone anormale ne peut pas s'expliquer par une teneur de fond anormale des roches mais probablement par l'existence d'une zone à chromite. Cette observation est à rapprocher de la présence de chromite dans les concentrés de batée effectués dans le vallon du Grand Eyvia.

Ce fait est important car les chromites constituent souvent des pièges à platinoïdes (nous pouvons remarquer que Ir a été décelé (5 ppb) dans une roche de ce secteur).

L'anomalie en Pb est trop ponctuelle pour être interprétable. Cet élément, du fait de sa faible mobilité, n'est pas un très bon indicateur des minéralisations plombo-zincifères ; Zn lui est préférable (Reedmann, 1979).

2.3.1.3. Val Grauson (Planches 4a, b, c, d et e).

- Contexte géologique : Schistes lustrés à ophiolites (zone de Zermatt-Saas-Fee).
- Nombre de prélèvements : 15.
- Indices miniers : aucune exploitation, seulement quelques petits indices manganésifères.

- Répartition des éléments : l'association Ni-Cr-Co-Mn est la seule qui ressorte nettement. Les autres éléments sont distribués de façon homogène sur le réseau hydrographique. Le rattachement de Mn au groupe Ni-Cr-Co peut s'expliquer par le chimisme des serpentinites à magnétite : les magnétites de Cogne sont riches en Mn, cet élément se substituant au Fe.
- Anomalies : un seul échantillon montre des anomalies en Ni (anomalie certaine) et Cr (anomalie probable). Cette anomalie semblerait liée à la présence d'un affleurement de serpentinites en amont.
A noter que comme dans le vallon de Saint-Marcel, les indices manganésifères ne sont pas décelés par les stream-sédiments.

2.3.2. Vallon de Valeille (planches 5 a, b, c, d et e).

- Variabilités géologiques des éléments en traces classées par ordre croissant.

Th	Be	Zr	Pb	Cr	P	Mn	V	Sr	Ti	Ni	Zn	Cu	Co
0,13	0,16	0,21	0,25	0,32	0,33	0,35	0,38	0,43	0,43	0,51	0,55	0,85	0,95

Quatre éléments en traces seulement présentent une variabilité supérieure à 0,50 : Ni, Zn, Cu, Co : ces éléments sont en général associés dans les roches : ils le sont sans doute sous la forme de sulfures et de sulfo-arséniures dans ces roches, comme l'indique la présence de minéralisations sulfurées dans les micaschistes du Grand Paradis.

- Contexte géologique : gneiss et micaschistes du Grand Paradis.
- Nombre de prélèvements : 14.
- Indice minier : Filon minéralisé en Pb-Zn-Cu-As-Ag-Au de Valeille.
- Répartition des éléments :
les éléments peuvent se regrouper en deux ensembles d'après l'étude des cartes de répartition :
Ni-Cr-Co-V ;
Pb-Zn-Cu.
Le premier groupe ne correspond pas, étant donné l'absence de roches ultrabasiques, à une minéralisation .

Le groupement Pb-Zn-Cu est caractéristique de la présence de sulfures.

- Anomalies : un échantillon du Sud du vallon présente une association d'anomalies intéressantes :

. anomalies certaines en Sr, V et Cr. De plus cet échantillon est particulièrement riche en P (0,59 % de P_2O_5) en Ti (2,06 %), en Ca (5,18 % CaO) et en Fe (9,03 % Fe). L'abondance en Ti et en P suggère la présence importante d'apatite et de sphène. V sous forme V^{5+} se substitue facilement à P dans l'apatite ou à Ti (sous forme V^{4+}) dans le sphène : ce qui peut expliquer la richesse en V. Sr se trouve dans les structures des minéraux. Ces derniers sont essentiellement les feldspaths et l'apatite dans les roches ignées. Sr caractérise aussi les roches sédimentaires calciques dans lesquelles il se trouve à des teneurs plus élevées que dans les roches ignées. La teneur élevée constatée pour Cr est problématique ; cet élément est caractéristique de milieux basiques ou ultrabasiques : la présence de minéraux indépendants est improbable et nous pouvons penser qu'ici il se trouve en substitut dans des minéraux silicatés tels des amphibolites (les hornblendes peuvent contenir 1 400 ppm de Cr, Rankama 1949). Cet ensemble de caractères suggère la présence de roches à caractère basique.

- . une anomalie en Cu est située au niveau de l'indice de Valeille mais aucune teneur élevée n'est décelée pour Zn et Pb.
- . Dans le Sud du vallon, l'anomalie en Zn est trop isolée pour être interprétée.

2.3.3. Vallées de Gressoney et Ayas

- . Variabilités géologiques classées par ordre croissant.

P	Zn	Ti	Be	Sr	Zn	Mn	Pb	V	Co	Th	Cu	Cr	Ni
0,21	0,26	0,30	0,31	0,35	0,38	0,41	0,48	0,50	0,55	0,56	0,63	0,90	0,94

Les valeurs sont en général plus élevées que dans les cas précédents ; ceci est lié aux conditions géologiques beaucoup plus variées. Cr et Ni, éléments variant le plus fortement, sont les éléments caractéristiques des roches ultrabasiques. Les valeurs observées pour V, Co et Cu pourraient indiquer une répartition complexe de ces éléments.

Th caractérise essentiellement les roches acides.

Dendrogramme des corrélations positives (Fig. 165 et Tableau 15) :

- . Les 14 éléments se répartissent en quatre groupes et quatre éléments indépendants.

- . La grappe Cr-Ni-Co caractérise les roches ultrabasiqes. Cette grappe est complètement isolée des autres éléments, ce qui met en relief le chimisme très particulier des roches ultrabasiqes. Zn et Cu sont fortement corrélés et Pb peut se rattacher à cette grappe "sulfures".
- . L'association Th-P (Be) n'est pas due au comportement chimique de ces éléments, mais reflète la minéralogie des roches concernées (gneiss). Ces commentaires peuvent s'appliquer à l'association Sr-Ti-Zr.

2.3.3.1. Vallée de Gressoney (planches 6 a, b, c et d)

- Contexte géologique : Gneiss du Mont Rose et de la zone Sesia.
Schistes lustrés à ophiolites (zone de Zermatt-Saas-Fee et zone de Combin).
- Nombre de prélèvements : 50.
- Indices miniers : indice aurifère de Pisse ;
indices cuprifères de Salsa Schelbete
- Répartition des éléments :
Deux groupements d'éléments apparaissent :
 - . Cr-Ni-Co,
 - . Zn-Cu-Pb.
 Les autres éléments (V-Sr) ne s'apparentent franchement à aucun des groupes ci-dessus.
L'assemblage Cr, Ni, Co regroupe les éléments en traces accompagnateurs des oxydes des roches ultrabasiqes (magnétite). Leur répartition est directement liée à celle des serpentinites. Co se singularise dans ce groupe par sa présence dans le ruisseau issu du Mont Stoemberg où il se trouve associé à Zn, Cu et Pb.
Dans ce cas, l'origine de ces éléments est à rechercher dans les sulfures des roches basiques (prasinites et amphibolites) ou acides (gneiss du Mont Rose).
L'absence de Cu, Pb, Zn et Co dans la branche NW de la vallée de Gressoney, où l'on ne trouve que des roches basiques, laisse supposer que les sulfures proviennent de la zone du Mont Rose.
- . Les éléments du second groupe (Pb-Zn-Cu) sont pratiquement absents de la zone à serpentinites. Ils se concentrent le long du contact SE entre les serpentinites de la zone de Zermatt-Saas-Fee et la zone du Combin (prédominance de calcschistes et de micaschistes avec quelques lentilles de roches basiques).
Les sulfures responsables des teneurs élevées en Pb, Zn et Cu peuvent avoir pour origine la zone du Combin ou bien les gneiss de la zone Sesia.

La zone du Combin, abondamment représentée à l'W de Gressoney, ne donne pas lieu à une augmentation notable des teneurs en Pb, Zn et Cu dans les stream sediments. Il paraît donc plus logique de considérer les gneiss de la zone Sesia comme origine de ces sulfures.

- . V montre une répartition hétérogène qui se rapproche de celle de Co. Les teneurs en V sont élevées le long du contact SE entre les serpentinites et la zone du Combin, en aval de Gressoney et sous le Mont Stoemberg.
- . Sr est pratiquement absent à l'ouest où les roches vertes dominant. Il est concentré le long du contact E entre les serpentinites et les métasédiments. La corrélation positive très forte ($R = + 0,85$) entre Sr et CaO indique que les calcschistes sont la source du Sr.
- Observations
Il est intéressant de noter que l'on trouve très peu de teneurs élevées dans les cours d'eau principaux : pour les 8 éléments étudiés, seules quatre valeurs (2 en Pb, 1 en Zn, 1 en Cu) sont supérieures à la moyenne dans le cours d'eau principal en aval de Gressoney. Ce phénomène de dilution est très net dans le cas de Sr où les valeurs sont très fortes dans les affluents et où aucune valeur n'est supérieure à la moyenne dans le torrent principal. Ceci montre l'intérêt de ne pas échantillonner seulement dans le cours d'eau principal mais aussi et surtout dans les tributaires.
- Anomalies
Cr, Co, Ni : Deux prélèvements présentent des teneurs très élevées :
 - . au NW de Gressoney
Cr : 1 310 ppm
Ni : 1 660 ppm
Co : 121 ppm
 - . en rive droite du lac Gabiet
Cr : 1 060 ppm
Ni : 872 ppm
Co : 90 ppm
 Ces deux échantillons sont exceptionnellement riches en Mg (20,4 % et 14,3 % MgO).
Les anomalies sont liées aux ensembles ultrabasiqes, mais leur caractère très ponctuel laisse supposer l'existence très localisée de roches plus magnésiennes dans cet ensemble. Ces roches pourraient éventuellement se révéler porteuses de minéralisations chromifères et nickélicifères.

Un kilomètre au NW du Lac Gabiet, une anomalie probable en Cr (861 ppm) et V (208 ppm) est associée aux roches basiques de ce secteur, l'absence de Ni et Co excluant l'origine ultrabasique.

Pb-Zn-Cu : un seul échantillon (rive gauche du Lac Gabiet) associe ces éléments à des teneurs élevées. Cette anomalie a pour origine les gneiss de la zone Sesia.

2.3.3.2. Val d'Ayas (planches 7 a, b, c, d, e et f).

- Contexte géologique : Schistes lustrés à ophiolites

Gneiss du Mont Rose

Gneiss de la zone Sesia

- Nombre de prélèvements : 44

- Indices miniers : indices aurifères de Brusson et Fénillaz ;

indice cuprifère d'Arbaz ;

indice cuprifère d'Ayas.

- Répartition des éléments :

La répartition des éléments dans cette vallée est guidée par la géologie : deux zones se dégagent :

. au SE de la vallée, l'association Th, Be, Sr reflète l'influence de la zone Sesia-Lanzo (gneiss) ;

. le torrent principal montre une association Ni-Cr caractéristique des roches ultrabasiques des schistes lustrés.

Les autres éléments (Co, V, Pb, Zn, Cu) sont présents dans les deux zones ; nous pouvons toutefois regrouper Pb, Zn et Cu, présents sur les deux affluents du secteur SE.

V et Co sont totalement absents de l'affluent provenant du Mont Nery.

Nous pouvons donc diviser la vallée en trois zones en fonction des associations d'éléments :

. torrent principal : Association (Ni-Cr-Co), (V), (Pb-Zn-Cu)

Caractères : "ultrabasique" "basique" (à sulfures)

. Secteur Mont-Néry : (Th-Be-Sr), (Pb-Zn-Cu)

Caractères : "acide" à sulfures (Zone Sesia)

. Secteur NE de Brusson : (Th-Be-Sr-V), (Co-Pb-Zn-Cu)

Caractères : "acide" (à sulfures) - "basique"

- Anomalies :

. Au Nord : anomalie en chrome et cobalt liée au massif de serpentinites.

. Les gneiss de la zone Sesia semblent être l'unité pétrographique la plus intéressante pour la recherche de sulfures : des échantillons anormaux en Pb,

Cu et Zn sont situés sur l'affluent issu du Mont-Nery. Un point particulièrement intéressant associe deux anomalies probables en Cu et Zn.

. Mo et Ag.

Un échantillon situé au Nord de la vallée présente des teneurs exceptionnelles pour ces deux éléments :

. Mo : 260 ppm

. Ag : 15 ppm

Les seuils d'anomalies fournis par la bibliographie (Reedmann, 1979) sont de 0,5 ppm pour Ag et 10 ppm pour Mo.

Le cuivre et le cobalt sont également associés à ces deux éléments, ce qui indiquerait la présence d'une minéralisation complexe sulfurée argentifère en amont.

Le molybdène, indicateur de molybdénite pourrait être associée à cette minéralisation à rechercher dans les schistes lustrés ou les terrains triasiques.

Un contrôle analytique de cet échantillon, ainsi que le prélèvement de nouveaux échantillons s'imposent évidemment.

2.3.4. Val Vény - Val Ferret

Variabilités classées par ordre croissant.

Mn	Zn	Be	Th	Sr	Zr	Ti	V	Cr	Ni	Cu	Co	P	Pb
0,30	0,39	0,43	0,46	0,47	0,49	0,49	0,49	0,55	0,56	0,59	0,69	0,73	0,76

Ce tableau se singularise de ceux préalablement établis pour les autres vallées par les variabilités très fortes constatées pour P et Pb.

Le chiffre obtenu pour Pb s'explique par la richesse en minéralisations plombifères de cette région (associées à la barytine). Les valeurs des teneurs de fond (b) en Pb sont d'ailleurs supérieures, notamment dans le Val Vény (30 ppm), à celles trouvées dans les autres vallées (< 20 ppm).

La faible variabilité des éléments tels Be, Th, Sr, Zr et Ti souligne l'homogénéité géologique de cette région.

L'influence des zones acides est nette au niveau des teneurs en Be et en Th ; l'absence de roches ultrabasiques abaissent de façon spectaculaire les teneurs en Ni et en Cr.

Dendrogrammes des corrélations positives (Fig. 166 et Tableau 16).

Les 14 éléments considérés se répartissent en trois grappes et quatre éléments relativement indépendants :

- Cr et V sont fortement corrélés, ce qui traduit l'affinité existant entre ces deux éléments. Le rattachement de Ni et Cu à cette grappe suggèrent une association Cr, V, Ni, Cu dans des sulfures ;
- la grappe P-Ti caractérise l'apatite et le sphène
- les sulfures sont représentés par l'association Pb-Zn ;
- les autres éléments (Be, Th, Sr, Mn, Zr) montrent des corrélations moins fortes, ce qui souligne soit leur comportement complexe, soit leur tendance à former des minéraux indépendants, soit leur association avec un élément majeur.

2.3.4.1. Val Vény (Planches 8 a, b, c et d)

- Contexte géologique : Contact massif cristallin du Mont-Blanc et zone helvétique (calcaires, marnes, schistes).
- Nombre de prélèvements : 40.
- Indices miniers : Mont-Chatelet (Pb-Zn).
- Anomalies :
 - . L'affluent provenant du Mont-Chatelet indique une forte anomalie en Pb-Zn-Cu-Ni. Ce point est situé en aval d'un indice minier connu (Mont-Chatelet). Ceci permet de vérifier que dans une vallée à remblaiement morainique, la prospection géochimique par stream-sédiments est néanmoins bien adaptée.
 - . Un autre échantillon, situé au même niveau de la vallée principale mais en rive droite, montre une association d'anomalies identique (Cu, Zn, Ni). L'existence de minéralisation en amont de ce point n'était pas connue avant cette étude.
 - . Mo se concentre au débouché du Glacier du Miage. Nous connaissons la présence de molybdénite dans les moraines de ce glacier.

2.3.4.2. Val Ferret (Planches 9a, b, c, d et e)

- Contexte géologique : Contact massif cristallin du Mont-Blanc et zone helvétique (calcaires, marnes, schistes).
- Indices miniers : Dans le haut Val Ferret nous connaissons un indice de Pb et Zn (col Ferret). Dans cette vallée il existe également quelques petits indices de barytine.

- Nombre de prélèvements : 33.

- Anomalies :
 - . Anomalies certaines : Pb, Zn, Th.
 - . Anomalies probables : 2 Pb, Cu, 2 Ni.

L'indice minier (Pb-Zn) du Col Ferret se traduit par des anomalies stream sédiments en Pb, Zn et Cu.

En aval du Col Ferret une anomalie probable Pb associée à une valeur relativement forte en Zn, permet de penser que la source de ces éléments est importante et liée probablement à l'indice du Col Ferret.

Les anomalies probables Ni et V sont à rattacher à un des minéraux non identifiés. Mais l'absence de Pb, Zn et Cu exclut une minéralisation sulfurée.

Les anomalies en Th sont fréquentes et associées au massif granitique. L'association de Th avec U est classique mais non systématique. L'anomalie certaine de Th associée au Pb est une association compréhensible.

2.3.5. Val Rutor (Planches 10 a, b et c)

- Contexte géologique : Zone Briançonnaise externe (zone permocarbonifère, schistes, grès, conglomérats).
 - Indices miniers : Mine de Promise : Pb, Zn, Cu, Ag.
Mine d'anthracite de La Thuile.
 - Nombre de prélèvements : 35.
- Les 35 échantillons se répartissent de la façon suivante : 13 dans le Val Rutor et 22 sur le plateau Chaz-Duraz. Le traitement statistique concerne les 35 échantillons appartenant à la même zone géologique. Les résultats des 22 stream sédiments de Chaz-Duraz sont donnés dans le troisième chapitre de la deuxième partie.
- Anomalies :
 - Il n'y a pas d'anomalie forte dans le Val Rutor (phénomène de dilution important). Par contre les fortes teneurs en Cu, Pb, Zn, en aval de la mine de Promise, sont liées à la contamination par les anciennes halles et les travaux de remblaiement autour de la mine.

En rive gauche du Val Rutor, à l'W de la mine de Promise, sur un confluent du torrent principal, nous avons deux fortes teneurs en Ni et Cu, en dehors de la zone contaminée. La minéralisation de Promise semble donc se poursuivre vers l'W.

2.4. BILAN DE LA PROSPECTION PAR STREAM SEDIMENTS

En conclusion à ce travail, nous pouvons considérer que les résultats obtenus présentent trois aspects positifs :

- l'étude des corrélations et des associations d'éléments montrent une dépendance très forte entre les conditions géologiques et les caractères géochimiques des stream sediments. Cette constatation est importante car elle détermine les possibilités d'existence de minéralisations dans certaines unités pétrographiques préférentielles (Ni, Cr et Co dans les serpentinites ; Mo et Th dans le massif du Mont Blanc ; Pb, Zn et Cu dans les gneiss de la zone Sesia) ;
- les exemples fournis par la détection aux stream sediments des anciennes mines du Mont Chatelet et du Col Ferret sont significatifs de l'efficacité de cette méthode rapide et peu coûteuse ;
- l'étude critique des anomalies nous a conduit à sélectionner certains secteurs qu'il serait souhaitable de prospector plus finement :
 - . la région de la Pointe Noire (vallon du Grand Eyvia) pour le chrome ;
 - . le val Vény pour Th et l'association Pb, Zn, Cu ;
 - . le val Ferret pour Th, Mo, Pb, Zn et Cu ;
 - . les gneiss de la zone Sesia dans le val d'Ayas pour l'association Pb, Zn, Cu ;
 - . le haut vallon d'Ayas pour Mo et Ag ;
 - . les serpentinites de la vallée de Gressoney pour Cr et Ni.

De plus, la prospection ayant été particulièrement positive, nous conseillons de généraliser cette méthode sur l'ensemble du Val d'Aoste. Ce travail serait à effectuer simultanément avec la prospection par batées, ces deux méthodes se complétant.

CHAPITRE III

PROSPECTION REGIONALE PAR BATEES

A l'exception de quelques secteurs où était recherché l'or, il n'y a eu, dans les Alpes occidentales, aucune activité de recherche de minerais métalliques par prospection à la batée.

La prospection à la batée des alluvions effectuée dans le Val d'Aoste autour des gisements connus, s'avère efficace pour la plupart des substances recherchées (tungstène, plomb, zinc, mercure, baryum, antimoine et or). C'est pourquoi nous avons étendu cette prospection de façon systématique sur un bon nombre de vallées, dans des zones où des minéralisations sont connues et dans des zones favorables à la découverte de nouveaux gisements.

Cette étude n'est malheureusement pas complète (la maille est trop large ; certaines vallées n'ont pas été prospectées), mais les quelques résultats obtenus présentent un inventaire assez largement étalé de certaines minéralisations métalliques qui permettent de fixer les meilleurs points d'attaque pour des recherches ultérieures. Sur la carte des batées, la représentation des minéraux comporte deux dimensions selon les teneurs. La différenciation des espèces minérales est matérialisée par le symbole chimique de l'élément constituant l'espèce.

La géologie des zones prospectées est présentée sur les planches 11 et 12.

3.1. CONDITIONS DE PRELEVEMENT

Le Val d'Aoste est un pays à fort relief, aux dénivellations importantes. Le régime des cours d'eau, torrentiel, est peu favorable à la concentration des métaux. Les minéraux friables (stibine, molybdénite) sont difficilement récupérables. Dans les fonds de vallée, la couverture de terrains morainiques est presque totale et les affleurements sont rares. Il n'est généralement pas possible d'observer le substratum en place sur le lieu du prélèvement. Les moraines, de par leur origine même, peuvent contrarier toutes les interprétations sur l'origine des métaux.

3.2. OBSERVATIONS SUR LA CARTE DES CONCENTRES DE L'OUEST DU VAL D'AOSTE (Planche 13)

- Association scheelite, cassitésite, or (W-Sn-Au)

L'association W, Sn, Au, observée dans les alluvions du haut-vallon du Valsavaranche est liée aux roches du massif du Grand Paradis. La même interprétation est douteuse pour le val de Cogne car nous connaissons un indice aurifère au lieu dit Pondel dans les gneiss permo-carbonifères.

- La scheelite (W)

Elle est très fréquemment identifiée dans les concentrés de batée et abonde particulièrement dans les torrents drainant les formations calcaires mésozoïques (Val Chavanne, Val d'Orgère, Val La Thuile, Val Sapin).

- Association or, barytine, scheelite et galène (Au, Ba, W, Pb)

Elle semble liée, dans le Val de Rhêmes, aux formations gneissiques du Grand Paradis.

- La molybdénite (Mo)

Minéral très friable, nous la rencontrons dans les vallées Vény et Ferret. La molybdénite est déjà connue dans le Val Vény (moraines du glacier du Miage) et sa présence a été confirmée par l'étude des stream sediments. Dans le Val Ferret, par contre, nous ne connaissons pas d'indice de Mo. Il est probable que son origine soit à rechercher dans les roches acides du massif du Mont Blanc.

- La galène et la blende (Pb, Zn)

Elles sont rares. Les fortes teneurs trouvées dans le Val Vény, sont liées au gisement plombo-zincifère du Mont Châtelet. La présence de Pb dans le Val hutor est probablement due à la contamination par les travaux de terrassement de la mine de Promise. Nous connaissons également en haut du Val Ferret, un indice Pb, Zn. Par contre la présence de Pb dans les alluvions du Grand Paradis n'était pas connue avant nos recherches.

- La barytine (Ba)

Elle est fréquente dans le Val d'Aoste. Deux districts semblent se détacher :

- . district du massif du Mont Blanc (Val Vény et Val Ferret) et des terrains mésozoïques (Val Sapin) ;
- . district des micaschistes et gneiss permo-carbonifères (Val Vertosan).

- La chromite (Cr)

La chromite provient des roches vertes des schistes lustrés situées en amont de Cogne. La présence de moraines et la résistance élevée de ce minéral à l'érosion, ne permettent pas d'estimer la zone d'origine.

- L'or (Au)

Il est relativement fréquent et son origine est indéterminée.

3.3. OBSERVATIONS SUR LA CARTE DES CONCENTRES DU VAL D'AYAS (Planches 12 et 14)

- La scheelite (W)

Ce minéral est identifié dans tous les concentrés. Il est plus particulièrement abondant dans les échantillons du bas de la vallée et, dans ce secteur, la scheelite est signalée dans la paragenèse métallique du gisement de Villaz (pyrite, or).

L'omniprésence de la scheelite ne permet pas de préciser son origine.

- La galène (Pb)

Elle n'est reconnue que dans le Sud de la vallée et ceci est à mettre en parallèle avec les anomalies en Pb, Zn, Cu, constatées dans les stream sediments provenant des gneiss de la zone Sesia.

- L'or (Au)

Sa présence est limitée aux secteurs aurifères de Brusson-Fenillaz. L'or est bien représenté dans les secteurs aurifères de Brusson-Fenillaz. Il apparaît également en dehors de ces secteurs déjà bien connus, notamment, en aval du Val de Cogne, dans le Val de Rhêmes, dans le Val Ruitor et en aval du Val La Thuile.

3.4. CONCLUSIONS

Cette méthode permet de détecter des minéralisations présentes dans les bassins versants des cours d'eau prospectés mais ne permet pas de préciser immédiatement sans travaux appropriés la localisation d'origine des minéraux trouvés compte tenu de leur transfert.

Toutefois, nous remarquons que la plupart des concentrés de fond de batées fournissent des résultats positifs :

- la barytine domine au Nord du Val d'Aoste ;
- la scheelite est décelée sur l'ensemble du territoire ;
- l'or, la cassitérite, la molybdénite, la chromite, la galène et la blende sont apparus localement.

Le caractère d'une dispersion régionale mais de proportion relativement importante des minéralisations en tungstène et en barium nous amène à émettre l'hypothèse que ces minéraux sont disséminés dans les lits des roches sédimentaires peu métamorphiques et métamorphiques (Planche 11). Cette hypothèse devra être étayée par de nombreuses analyses des batées et d'une analyse géochimique régionale.

Le caractère local des minéralisations des autres métaux laisse apparaître une origine concentrationnelle (amas ou filons). En conséquence nous proposons de poursuivre cette étude selon deux orientations :

- compléter la carte des batées ;
- affiner la prospection (maille plus serrée) sur les zones qui se sont avérées intéressantes.

RÉCAPITULATIF DES RÉSULTATS OBTENUS

ÉTUDE DES GISEMENTS

- Les gisements de magnétite (Cogne et zone de Zermatt-Saas-Fee)

L'étude géochimique comparative des gisements de la zone de Zermatt-Saas-Fee et de la zone du Combin, complétant les études antérieures (J.L. Garciaz, 1979 - J. Pocachard, 1980) permet de conclure que le gisement de Cogne apparaît comme un accident métallogénique résultant d'un processus différent de celui responsable de la genèse des autres concentrations de magnétite de la Région du Val d'Aoste. En conséquence il semble que les perspectives économiques soient peu encourageantes dans cette région pour la recherche de magnétite.

- Le gisement d'Hérin (Champdepraz)

L'analyse factorielle des résultats de stream sediments a confirmé les caractères géochimiques déduits de l'étude des sections polies et des analyses chimiques des roches, à savoir que le gisement d'Hérin se caractérise par l'association Fe-Cu-Zn-Co et par l'absence de Pb.

En outre, deux zones présentent des caractères suggérant l'existence de minéralisations cachées (à l'Ouest du village d'Hérin et dans le Val Pialon).

- Le gisement de Promise (Val Ruitor)

La prospection par polarisation spontanée met en évidence des plages négatives susceptibles de contenir une minéralisation de même nature que celle de la mine de Promise. Elles concordent parfaitement avec les structures géologiques et les indices minéralisés connus de la région.

La prospection magnétique met en évidence une structure linéaire orientée N 50° au SE des monts Belvédère et Chaz-Duraz dont les effets magnétiques sont élevés. La géométrie et la nature pétrographique (géochimie des stream sediments et des sols) semblent identiques à celles du gisement de Promise.

Localement à l'Est du Mont Belvédère (zone I) une lentille de 55 000 tonnes de pyrrhotite plus ou moins massive, est sub affleurante (nous rappelons que la pyrrhotite est accompagnée de la blende, de la galène et d'autres sulfures dont nous ne connaissons par les proportions).

L'extension horizontale du gisement de Promise est probablement kilométrique (Col de la Croix - Mont Belvédère) soulignée par une succession discontinue de lentilles dont les dimensions restent à préciser par travaux souterrains.

PROSPECTION RÉGIONALE

- Chimie des roches

L'inventaire des anomalies relevées dans les différents types de roches met en évidence l'intérêt présenté par les platinoïdes.

L'origine des platinoïdes est à rechercher dans les serpentinites, mais les fortes teneurs observées dans les roches situées au contact des serpentinites (amphibolites) et dans les minéralisations liées au métavolcanites (Petit Monde), sont l'indice de phénomènes de mobilisation importants.

- La serpentinitisation est, en présence de solutions riches en éléments volatils (Cl, As, Te, Bi, S), un facteur très important de mobilisation et de concentration des platinoïdes.

- Les concentrations éventuelles sont à rechercher dans les roches situées au contact des serpentinites, de préférence dans des zones riches en sulfures et en chlorites.

- Dans les serpentinites, l'iridium montre une concentration dans les échantillons les plus riches en nickel.

- L'anomalie en iridium dans le minerai de Cogne est associée à une anomalie en cuivre et en cérium.

- Les stream sediments

Nous pouvons considérer que les résultats obtenus présentent trois aspects positifs :

- l'étude des corrélations et des associations d'éléments montrent une dépendance très forte entre les conditions géologiques et les caractères géochimiques des stream sediments. Cette constatation est importante car elle détermine les possibilités d'existence de minéralisations dans certaines unités pétrographiques préférentielles (Ni, Cr et Co dans les serpentinites ; Mo et Th dans le massif du Mont Blanc : Pb, Zn et Cu dans les gneiss de la zone Sesia) ;

- les exemples fournis par la détection aux stream sediments des anciennes mines du Mont Chatelet et du Col Ferret sont significatifs de l'efficacité de cette méthode rapide et peu coûteuse ;

- l'étude critique des anomalies nous a conduit à sélectionner certains secteurs qu'il serait souhaitable de prospector plus finement :

- . La région de la Pointe Noire (vallon du Grand Eyvia) pour le chrome ;
- . le val Vény pour Th et l'association Pb, Zn et Cu ;
- . le val Ferret pour Th, Mo, Pb, Zn et Cu ;
- . les gneiss de la zone Sesia dans le val d'Ayas pour l'association Pb, Zn et Cu ;
- . le haut vallon d'Ayas pour Mo et Ag ;
- . les serpentinites de la vallée de Gressoney pour Cr, Ni et l'or.

- Les batées

Cette méthode permet de détecter des minéralisations présentes dans les bassins versants des cours d'eau prospectés mais ne permet pas de préciser immédiatement sans travaux appropriés la localisation d'origine des minéraux trouvés compte tenu de leur transfert.

Toutefois, nous remarquons que la plupart des concentrés de fond de batées fournissent des résultats positifs :

- la barytine domine au Nord du Val d'Aoste ;
- la scheelite est décelée sur l'ensemble du territoire ;
- l'or, la cassitérite, la molybdénite, la chromite, la galène et la blende sont apparus localement.

Le caractère d'une dispersion régionale mais de proportion relativement importante des minéralisations en tungstène et en barium nous amène à émettre l'hypothèse que ces minéraux sont disséminés dans les lits des roches sédimentaires peu métamorphiques et métamorphiques (Planche 11). Cette hypothèse devra être étayée par de nombreuses analyses des batées et d'une analyse géochimique régionale.

PROGRAMME

Recherche des platinoïdes

Elle pourrait se faire, au vu des abondances observées et de nos connaissances bibliographiques des phénomènes de mobilisation des platinoïdes dans les roches ultrabasiques, selon deux orientations :

- . dans les zones à sulfure ;
- . dans les zones à chromite.

- Les zones à sulfures :

Il serait souhaitable :

- . de confirmer les teneurs en platinoïdes obtenues sur les échantillons de minerai de la mine de Petit-Monde,
- . de procéder à l'analyse de nouveaux échantillons (sulfures et encaissant) des mines de Petit-Monde, Hérim, Plan François et Ollomont.

- Les zones à chromite :

La recherche des platinoïdes dans ces secteurs est à effectuer conjointement avec la recherche des chromites au moyen de la prospection par batées.

Les zones les plus intéressantes a priori sont :

- . la région de la Pointe Noire,
- . le secteur du Lac Gelé,
- . le secteur de Plan François.

- Le gisement d'Hérim (Champdepraz)

- Prospection géophysique :

Magnétométrie : la prospection au sol telle que nous l'avons effectuée n'est pas concevable du fait des conditions topographiques (relief prononcé) et de la végétation dense.

Nous proposons une prospection magnétique aéroportée (magnétomètre à double résonance nucléaire et méthode différentielle) celle-ci se faisant sur un secteur d'environ 10 km². L'existence de serpentinites dans ce secteur sera néanmoins une gêne pour l'interprétation des résultats.

- Prospection géochimique

Il n'est pas envisageable de poursuivre la prospection géochimique par stream sediments, la topographie ne se prêtant pas à ce style de prospection. Tous les secteurs accessibles ont pu être étudiés. Pour la même raison, la prospection par sol est éliminée.

- Le gisement de Promise

Dans l'état actuel du site de Promise (Val Ruitor), il serait tout à fait concevable d'engager une prospection par forages sur deux zones :

- à l'Est des monts Belvédère et Chaz-Duraz, en particulier sur la zone I (plateau Chaz-Duraz) ;
- en rive gauche du torrent Ruitor, à la hauteur des profils de polarisation spontanée n° 23 et 24 (en amont des anomalies électriques). Les conditions pratiques de forage sont favorables.

A partir des moyens de prospection que nous avons utilisés nous proposons :

- d'étendre la prospection par polarisation spontanée (il existe probablement plusieurs niveaux parallèles susceptibles de contenir une minéralisation). La poursuite de cette étude s'orienterait au Nord et au Sud de la zone déjà prospectée (même au-delà des frontières) ;
- de refaire certains profils mal orientés (plateau Chaz-Duraz) ;
- de compléter l'étude magnétique (plateau Chaz-Duraz et secteur Promise - Col de la Croix) avec soit le magnétomètre à protons, soit un magnétomètre plus sensible (magnétomètre à double résonance nucléaire, GAMCIS CEN Grenoble) ;
- de compléter l'étude géochimique (stream sediments, sols et roches) avec le but de reconnaître la nature pétrographique des corps qui engendrent les anomalies géophysiques ainsi que les secteurs dont le potentiel métallogénique uranifère n'est pas négligeable. En effet, nous avons commencé une étude en 1979 au scintillomètre sur le plateau Chaz-Duraz. Les résultats, insuffisants, devraient être complétés (rapport d'activité Val d'Aoste 1979) ;
- d'utiliser d'autres méthodes géophysiques. Les conditions de recherche dans cette région sont délicates. La polarisation spontanée a donné des résultats globaux et la magnétométrie a donné des résultats précis mais trop restreints. L'emploi des méthodes de V.L.F. ou de polarisation induite complèteraient les études précédentes.

- Stream sediments et batées

L'étude critique des anomalies nous a conduit à sélectionner certains secteurs qu'il serait souhaitable de prospector plus finement. De plus, ce type de prospection ayant été particulièrement positif, nous conseillons de généraliser cette méthode sur l'ensemble de la Région du Val d'Aoste.

A partir des résultats positifs de la prospection alluvionnaire par batées, nous proposons de poursuivre cette étude simultanément avec la prospection par stream sediments en :

- complétant la carte des batées ;
- affinant la prospection sur les zones qui se sont avérées intéressantes.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Globalement, la distribution des paragenèses minérales semble très bien se superposer aux différentes zones tectoniques et paléogéographiques des Alpes, marquée par leur chimisme particulier :

- zone helvétique au sens large : ceinture fluorée passant de Martigny (Suisse), Courmayeur (Trou des Romains) jusqu'au Pelvoux ;
- zone briançonnaise externe : ceinture plombo-zincifère représentée par les gisements d'Isérables (Suisse), des Sarrazins (Maurienne), de La Plagne (Tarentaise) et de Promise (Val Ruitor) ;
- zone des schistes lustrés : ceinture de cuivre, de fer et de manganèse représentée par les gisements d'Ollomont (Valpelline), de Petit-Monde (Valtournanche), d'Hérin (Champdepraz) de Cogne (Val Grand Eyvia) et de Prabornaz (Val Saint-Marcel).

Par contre, leurs caractères structuraux semblent communs : les concentrations minérales sont lenticulaires d'extension décamétrique (Promise) à hectométrique (Cogne), distribuées en chapelet selon une structure stratigraphique continue d'extension kilométrique (Promise, Ollomont).

A partir de l'étude des gisements du Val d'Aoste nous sommes tentés de concevoir le modèle génétique suivant :

- certains de ces gisements sont semblables à ceux des dorsales médio-océaniques actuelles. Ces derniers sont dus à l'activité de sources hydrothermales, le long des axes d'expansion des fonds océaniques. Pour cela, nous pouvons nous référer aux travaux effectués dans des régions comme la Mer Rouge, le golfe d'Aden et le Fossé des Afars (R.D. Bignell et al. 1976 et E. Bonatti 1975).

La perméabilité et les transferts convectifs de chaleur de la croûte océanique nouvellement formée, permettent à l'eau de mer :

- . de s'infiltrer dans la croûte jusqu'à des profondeurs de l'ordre de plusieurs kilomètres ;
- . de s'enrichir en métaux utiles aux dépens des roches lessivées (Govett, Goodfellow et Whitehead, 1976) ;
- . de remonter sous forme de solutions hydrothermales et de précipiter à la faveur d'une rupture d'équilibre thermodynamique.

La pérennité de ce phénomène permet de créer des concentrations minérales économiquement intéressantes dont la géométrie s'explique par des considérations d'ordre structural et thermodynamique.

En faisant appel aux travaux portant sur les milieux fibreux (J.Silvy, 1980) nous sommes amenés à considérer la structure poreuse de la roche.

La structure poreuse de la roche a une incidence primordiale sur la direction moyenne d'écoulement des circulations hydrothermales et détermine la géométrie du corps minéralisé (J. Pocachard, 1980).

La reconstitution des phénomènes génétiques est une opération difficile. La géométrie que prend un corps minéralisé au moment de sa formation est modifiée lors des phases tectoniques (mise en place des Alpes).

L'orogénèse alpine se caractérise par des phénomènes de compression du Crétacé supérieur au Pliocène (plissement alpin), entraînant des dissolutions, des transferts, des filtrages et des recristallisations de la matière (métamorphisme alpin).

Les résultats obtenus en particulier sur les indices de magnétite du Val d'Aoste ont montré que dans les serpentinites de la zone Zermatt-Saas-Fee, le fer se concentre très nettement dans les zones dilatées (charnières de plis, torsions de schistosité). Le gisement de Cogne, d'origine pré-métamorphique représente un cas particulier où l'influence des phénomènes tectoniques se limite au plissement du gisement.

Les caractères de ces structures minérales sont :

- les amas minéralisés sont d'extension décamétrique à hectométrique ;
- leur épaisseur maximale est métrique à décamétrique (les amas sont généralement compacts) ;
- leur développement en chapelet suit la stratification sur plusieurs kilomètres ;
- la continuité de la structure minéralisée est matérialisée soit par une couche décimétrique à métrique de minerai massif ou disséminé soit par des structures en faisceaux où abondent des filonnets de quartz. Cette continuité n'est pas systématiquement respectée ;
- la distance entre les amas minéralisés est variable mais elle semble rester du même ordre de grandeur que l'extension des amas. Il existe probablement une relation entre l'extension des amas et la distance entre les amas.

Ces considérations structurales nous conduisent à penser qu'il peut exister dans les Alpes et en particulier dans le Val d'Aoste, d'autres amas minéralisés dont le potentiel minier n'est pas négligeable. Les difficultés à surmonter au cours des prospections futures sont surtout dues :

- à la détermination des dimensions des gisements. Les structures géologiques le long desquelles apparaissent les minéralisations sont souvent de l'ordre kilométrique. Les amas minéralisés sont de dimensions variables et certains ont montré qu'ils peuvent susciter un intérêt économique ;
- à l'enfouissement rapide des minéralisations dans certains contextes topographiques limitant les méthodes de prospection. Néanmoins l'évolution des techniques de recherche et d'exploitation actuelles permettent une plus grande efficacité en régions montagneuses autrefois délaissées à cause des accès problématiques et d'un climat rigoureux.

En plus des orientations et des méthodes exposées dans le texte, un développement plus spécifique des recherches serait susceptible de faciliter la compréhension et les prospections futures dans les domaines suivants :

- études structurales associées aux problèmes des circulations des fluides minéralisés (structures poreuses), en liaison avec les méthodes de prospection géophysique légère ;
- études géochimiques en liaison avec l'évolution pétrographique et structurale.

BIBLIOGRAPHIE

- AGTERBERG F.P. (1974) - Geomathematics. Mathematical background and geo-science applications. Elsevier Scientific Publishing Company.
- AHRENS L.H. (1954) - Lognormal distribution of the elements. *Geoch. Cosmo. Acta*, vol. 5, pp. 49-73 et vol. 6, pp. 121-131.
- ALBAREDE F. (1976) - Some trace element relationships among liquid and solid phases in the course of fractional crystallization of magmas. *Geoch. Cosmo. Acta*, Vol. 40, pp. 667-673.
- ALLEGRE C.J., TREUIL M., MINSTER J.F. MINSTER B., ALBAREDE F. (1977) - Systematic use of trace element in igneous process. Part. 1 : fractional crystallization processes in volcanic suites. *Contr. Mineral. Petrol.* 60, pp. 57-75.
- AL'MUKHAMEDOV A.I. et SMIRNOVA N.P. (1967) - Titanium - chromium, a further geochemical criterion for the detection of Noril'sk -type trap intrusion. *Doklady Akad. Nauk. SSSR*, vol. 179.
- AMSTUTZ A. (1962) - Notice pour une carte géologique de la vallée de Cogne et de quelques autres espaces au Sud d'Aoste. *Archive Sc. Genève*, vol. 15, fasc. 1.
- ANDERSON C.A. (1969) - Massive sulfide deposits and volcanism. *Economic Geology*, vol. 64, n° 2.
- ANDRIAMBOLOLONA R. et DUPUY C. (1978) - Répartition et comportement des éléments de transition dans les roches volcaniques. *Bull. B.R.G.M.*, section II, n° 2.
- ANTOINE P. (1971) - La zone des brèches de Tarentaise entre Bourg-Saint-Maurice (vallée de l'Isère) et la frontière italo-suisse. *Mém. Lab. Géol. Grenoble*, n° 9.
- BADALOV S.T., ISLAMOV I.I. (1953) - Eléments en traces dans les minéraux du groupe des serpentinites comme indicateur de prospection des minéralisations cachées. *Doklady Akad. Nauk. Yzb SSR, Taskkend*, n° 4, pp. 27-31.
- BARRETI M. (1893) - *Geologia della provincia di Torino - Torino*.
- BEBIEN J. (1972) - Teneurs en TiO_2 des roches volcaniques : comparaison des volcanismes actuels et ophéolitiques, C.R.A.S. (Paris) t. 275, série D, pp. 1967-1970.
- BESNUS Y. (1976) - Méthode géochimique utilisant les courbes de régression appliquée à l'étude de la genèse des gisements métalliques. *Mém. hors série de la Soc. Géol. de France*, n° 7, pp. 215-218.
- BESSON B. et CAPITANT B. (1976) - Note sur le chimisme des roches ultrabasiques minéralisées en sulfures de nickel dans l'Abitibi (Province Supérieure Archéenne, Canada. *Bull. B.R.G.M.*, II série, n° 4).
- BETHKE P.M. and BARTON P.B. Jr. (1959) - Trace elements distribution as an indicator of pressure and temperature of ore deposition. *Geol. Soc. Am. Bull.*, Vol. 70, pp. 1569-1570.

- BEU S.A.A. (1964) - Distribution of Lithium in igneous rocks. *Geoch. Intern.*, pp. 808-811.
- BIGNELL R.D., CRONAN D.S. and TOOMS J.S. (1976) - Red sea metalliferous brine precipitates. Geological Association of Canada, Special paper number 14.
- BOCQUET J. (1974) - Etudes minéralogiques et pétrologiques sur le métamorphisme d'âge alpin dans les Alpes Françaises. Thèse Etat, Grenoble.
- BONATTI E. (1975) - Metallogenesis at oceanic spreading centers. *Ann. Rev. Earth. Planet. Sci.*, 3, p. 401.
- BOULLIER A.M. et BOUCHEZ J.L. (1978) - Le quartz en ruban dans les mylonites. *Bull. Soc. Géol. de France*, 7è série, t. XX, n°3, pp. 253-262.
- BURNS R.G. (1968) - Enrichments of transitional metal ions in silicate structure. Origin and distribution of the elements. Ed. L.H. Ahrens, pp. 1151-1164.
- BURRI C. (1954) - Petrochemical calculations. Israel Program for Scientific Translation, Jerusalem.
- BURTET-FABRIS B., DAL PIAZ G.V., OMENETTO P. (1971) - La paragenesi a solfuri e il significato delle inclusioni microscopiche in pirite nel giacimento piritoso-cuprifero di Petit-Monde. *Boll. Ist. di Miner. e Petro. di Padova*, n° 423.
- CABY R. (1968) - Gîtes métallifères alpins syntectoniques et métamorphiques dans la zone houillère axiale des Alpes françaises. *Chronique des mines*, sect. II, n° 5.
- CABY R. (1968) - Contribution à l'étude structurale des Alpes occidentales. Subdivisions stratigraphiques et structure de la zone du Grand-Saint-Bernard dans la partie Sud du Val d'Aoste. *Géologie Alpine*, t. 44, pp. 95-111.
- CABY R. (1974) - Gneiss permo-carbonifères d'origine magmatique et volcanique dans la zone houillère et la zone du Grand-Saint-Bernard en Val d'Aoste. *Géologie Alpine*, t. 50, pp. 39-45.
- CABY R. et COMES J. (1975) - Déformation alpine de la zone Sesia en Val d'Aoste. *C.R.A.S.*, t. 280, série D.
- CASTELLO P. (1977) - La ialofane e gli altri minerali del giacimento piombo-baritico del Trou des Romains (Courmayeur, Valle d'Aosta). *Rivista Mineralogica Italiana*, Vol. 8, fasc.1, pp. 7-18.
- CAVAGNINO U., DAL PIAZ G.U. et OMENETTO P. (1965) - Osservazioni sul giacimento piritoso cuprifero di fabbriche nell'alta Valsesia (Piemonte). *La Ricerca Scientific.*
- CERVALES G. (1959) - Enzmikroskopische untersuckungen der Erze aus "La Promise", La Thuile (Aostatal). *NJB Min. Abh.* 93, pp.203-219, Stuttgart.
- CHRISTMANN P. (1979) - Etude métallogénique de la mine de Copper Cliff (Cu-Au) Chibougamau. Province du Québec, Canada. Thèse Spécialité, Grenoble, 1979.
- CITA M.B. (1953) - Studi geologici sulla Val Ferret italiana. *Boll. Serv. Geol. Ital.* 75, pp. 62-175.

- COLLIN C.R., SALVI A., LEMERCIER D., LEMERCIER P., ROBACH F. (1973) - Magnétomètre différentiel à haute sensibilité. *Geophysical Prospecting*, 21, p. 704.
- COLEMAN R.G. (1971) - Petrology and geophysical nature of serpentinite. *Geol. Soc. Am. Bull.* 82, p. 897.
- COLEMAN R.G. (1977) - Ophiolites. *Mineral and Rocks*. 12, Ed. Berlin Springer.
- COMES J. (1975) - Tectonique alpine de la zone Sesia en Val d'Aoste. Thèse Spécialité, Montpellier.
- CONSTANTINOU G. and GOVETT G.J.S. (1976) - Genesis of Cyprus sulfide deposits. *Economic Geology*, Vol. 68, n° 6, p. 843.
- CRESAR D.A., SUSAK N.J., BORCSIK and SCHWARTZ S. (1978) - Solubility of the buffer assemblage pyrite + pyrrhotite + magnetite in Na Cl solutions from 200 to 350 °. *Geoch. Cosmo. Acta*, Vol. 47, n°9.
- CROCKET J.H. and CHYI L. (1972) - Abundances of Pd, Ir, Os and Au in alpine ultramafic pluton. 24 th I.G.C. Montréal, section 10, pp. 202-207.
- DABROWSKI H. - Thèse Etat (à paraître)
- DAL PIAZ G.V. et OMENOTTO P. (1966) - Le gisement de pyrite et cuivre d'Alagna Valsesia (Piémont). *Symp. Intern. Giacim. Min. delle Alpi*, Trento.
- DAL PIAZ G.V. (1974) - Le métamorphisme alpin de haute pression et basse température dans l'évolution structurale du bassin ophiolitique alpin-apenninique. 1ère Partie, *Boll. S.G.I.*, 93 et 2ème partie, *SMPM*, 54.
- DARS R., ALLEGRE C.J., MICHARD G. (1971) - Sur la formation de gisements stratiformes de plomb et zinc, un modèle de formation proposé d'après étude géologique. *C.R.A.S.*, t. 273, série D, pp. 1261-1264.
- DEBELMAS J. (1974) - Géologie de la France. Vol. I et II.
- DE VOS W. and WIAENE W. (1980) - Geochemical study of soils and metallogenetic implications dt Hiendelaencina, Guadalajara, Spain. *Min. Dep.* vol. 15, pp. 87-99.
- DICKEY J.S. (1975) - A hypothesis of origin for podiform chromite deposits. *Geoch. Cosmo. Acta*, Vol. 39, p. 1061.
- DOBRETISOV N.L. (1979) - New overthrusting model for blueschist metamorphism with reference to franciscan great valley problems. *Ophioliti* (4), 1, pp. 17-24.
- DOUSSET P.E., DABROWSKI H. (1979) - Minéralisations sulfurées de l'Ouest du Val d'Aoste. 7ème Réunion Annuelle des Sciences de la Terre, p. 164.
- DUKE J.M. (1976) - Distribution of the period from transition elements among olivine, calcic, clinopyroxene and mafic silicate liquid, experimental results. *T. Petrol.*, 17, pp. 499-521.
- ELTER G. (1945) - Rapports miniers sur les gisements du Val d'Aoste.

- ELTER G. et ELTER P. (1965) - Carta geologica della regione del Piccolo San-Bernardo, Note illustrative. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Padova.
- ELTER G. (1971) - Schistes lustrés et ophiolites de la zone piémontaise entre Orco et Doire Baltée (Alpes graies). Hypothèses sur l'origine des ophiolites. *Géologie Alpine*, 45, p. 147.
- FISCHESSER R. (1977) - Données des principales espèces minérales. Société de l'Industrie Minérale.
- FOMINYKH V.G. and KHVOSTOVA V.P. (1970) - Platinum content of Ural dunite. *Akad. Nauk. Doklady SSSR*, Vol. 191, n°2, pp. 443-445.
- FREY F.A. (1969) - Rare earth abundances in a high-temperature peridotite intrusion. *Geoch. Cosmo. Acta*, Vol. 33, pp. 1429-1447.
- FREY F.A. and GREEN D.H. (1974) - The mineralogy, geochemistry and origin of hercynite inclusion in Victorian basanites. *Geoch. Cosmo. Acta*, Vol. 38, p. 1023-1059.
- FREY M., HUNZIKER J.C., FRANK W., BOCQUET J., DAL PIAZ G.V. and NIGGLI P. (1974) - Alpine metamorphism of the Alps, *S.M.P.M.*, 54.
- FUCHS Y. (1976) - A propos de quelques exemples de relations entre altérations et concentrations métallifères (Pb, Zn, Cu, U, Ba, Sr, F,...) dans le domaine épicontinental. *Bull. Soc. Géol. de France*, 7, t. XVIII, n°1, pp. 91-94.
- GARCIAZ J.L. (1979) - Recherches minières au Sud du Val d'Aoste (Italie). Thèse Spécialité, Grenoble.
- GEX P. (1977) - La méthode de polarisation spontanée. Essai de réhabilitation. Thèse Etat, Lausanne.
- GEX P. et MOREL F. (1977) - Mesures de polarisation spontanée sur les gîtes pyritocuprifères d'Alagna Valsesia et Ollomont (Italie). *Bull. des laboratoires de Géologie de l'Université de Lausanne*, n° 221.
- GIOAN P. (1978) - Etude de quelques gîtes métallifères alpins par magnétométrie différentielle à haute sensibilité. Thèse Spécialité, Grenoble.
- GOVETT G.J.S., GOODFELLOW W.D., WHITEHEAD R.E.S. (1976) - Experimental aqueous dispersion of elements around sulfides. *Economic Geology*, Vol. 71, pp. 925-940.
- GRANIER C.L. (1971) - Informations données par les méthodes de prospection géophysique et géochimique. Colloque de Géophysique Minière, BRGM éditeur.
- GRANIER C.L. (1973) - Introduction à la prospection géochimique des gîtes métallifères. Masson and Cie.
- HACINI A. (1971) - Les éléments de transition dans le cortège ophiolitique des nappes d'Antalga (Turquie). Thèse Spécialité, Univ. Sc. Tech. Languedoc.
- HAKLI T.A., HANNINEN, VUORELAINEN Y. and HEIKKI PAPUNEN (1976) - Platinum-Group minerals in the Hitura nickel deposit, Finland. *Economic Geology*, Vol. 71, pp. 1206-1213.

- HEIER K.A. et ADAMS J.A.S. (1964) - The geochemistry of the alkali metals. *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 5, pp. 251-381.
- HUTCHINSON R.W. (1973) - Volcanogenic sulphide deposits and their metallogenic significance. *Economic Geology*, Vol. 68, pp. 1223-1246.
- KOGARKO L.N. (1973) - The Ni/Co ratio as an indication of the mantle origin of magmas. *Geochim. Intern.*, 10/5, pp. 1081-1086.
- KOROLEVA N.N. (1971) - Relation between Ag/Au ratio and mineral associations. *Geoch. Intern.* Vol 8, n°2.
- KRUPYANSKII Y.F. and SUZDALEV (1974) - Size effects in fine particles of Fe_3O_4 . *Jour. de physique*, Coll. C6, suppl. 12, T.35, p.c. 6, 407.
- KURDYUKOV A. (1968) - An estimate of the redox potential of rocks. *Doklady Akad. Nauk. SSSR.*, Vol. 183, pp. 186-198.
- LANCELOT J.C. (1979) - Etude tectonique de la zone des brèches de Tarentaise dans la région de Bourg-Saint-Maurice. Thèse Spécialité, Paris VII.
- LA ROCHE (H. de) (1968) - Comportement géochimique différentiel de Na, K et Al dans les formations volcaniques et sédimentaires. *C.R.A.S.*, t. 267, série D, pp. 39-42.
- LAVILLE-TIMSIT L., LELEU M. et WILHELM E. (1976) - Note préliminaire sur le comportement des éléments Cu, Pb, Zn, Ag, Mn, As, Bi lors de l'altération supergène d'une minéralisation sulfurée. *Bull. Soc. Géol. France*, 7, t. XVIII, n°1, pp. 101-105.
- LAVILLE-TIMSIT L. (1977) - Comportement des métaux dans la zone d'oxydation supergène des minéralisations sulfurées. *Bull. B.R.G.M.*, II^e série, section II, n° 4, pp. 231-249.
- LEEMAN W.P. and LINDSTROM D.J. (1978) - Partitioning of Ni^{2+} between basaltic and synthetic melts and olivines, an experimental study. *Geoch. Cosmo. Acta*, Vol. 42.
- LEPELTIER C. (1969) - A simplified statistical treatment of geochemical data by graphical representation. *Economic Geology*, Vol. 64, pp. 538-550.
- LINDSTROM D.J. and WEILL F. (1978) - Partitioning of transition metals between diopside and coexisting silicate liquid Nickel, Cobalt and Manganese. *Geoch. Cosmo. Acta*, vol. 42, pp. 817-831.
- MALAKHOV I.A. and ZAVARITSKIY A.N. (1970) - Thermodynamic condition of serpentinization of ultramafic rocks. *Doklady Akad. Nauk. SSSR*, Vol. 200, pp. 220-221.
- MINEYEV D.A. (1963) - Study of the correlation between lanthanides in rocks. *Doklady Akad. Nauk, SSSR*, Vol. 154, p. 150-152.
- MIYASHIRO (1975) - Classification, characteristics and origin of ophiolites. *Journal of Geology*, Vol. 83, pp. 249-281.
- MONTIGNY R. (1975) - Géochimie comparée des cortèges de roches océaniques et ophiolitiques. Problèmes de leur genèse. Thèse Spécialité, Paris.

- MOREL F. (1978) - L'extension du filon Pb-Zn de Goppenstœin (Valais Suisse). Contribution à son étude géophysique et géochimique. Thèse Etat, Lausanne.
- NALDRETT A.J. and CABRI L.J. (1976) - Ultramafic and related mafic rocks : their classification and genesis with special reference to the concentration of nickel sulfides and Platinum - Group elements. *Economic Geology*, Vol. 71, pp. 1131-1158.
- NATALE P. (1966) - Osservazioni sul metamorfismo dei minerali metallici nel giacimento pirito-cuprifero di Saint-Marcel (Val d'Aosta). *Symp. Intern. Giac. Min. Alpi, Trento, Mendola 2*, pp. 901-904.
- NIGGLI P. (1952) - Rocks and minerals deposits. Freeman W.H. and Cie, San Francisco.
- NORDEMAN D., LAJ C. et DANON J. (1979) - Minéralogie magnétique de la lave de Laschamp. 7ème Réunion Annuelle des Sciences de la Terre.
- OERTEL A.C. (1969) - Frequency distributions of elements concentrations, theoretical aspects. *Geoch. Cosmo. Acta*, vol. 33, pp. 821-831.
- PERRUCHOT A. (1973) - Partage du Nickel entre serpentine et brucite au cours de la serpentinisation du péridot. *Contr. Mineral. and Petrol.* 42, p.229-234.
- PETERS W.C.(1978) - Exploration and mining geology. Ed. Wiley & Sons.
- PICOT P. et PIERROT R. (1976) - Les minéraux en traces dans les minerais et leurs associations. Significations géologiques et gîtologiques de leur existence. *Mém. hors série, n°7, Soc. Géol. de France, section V.*
- PICOT P. et JOHAN Z. (1977) - Atlas des minéraux métalliques. *Mémoire du BRGM, n°99.*
- PIEPOLI P. (1927) - Osservazioni sul giacimento piritoso cuprifero di Champ de Praz. *Reali Acc. dei Lincei, série VI, Vol. 25, Roma.*
- PIEPOLI P. (1934) - Contributo allo studio dei giacimenti piritoso cupriferi delle Alpi occidentali :
1) Il giacimento di Ollomont. *Boll. Soc. Geol. Ital., Vol. 52, fasc.2,*
2) Il giacimento di Petit-Monde. *Boll. Soc. Geol. Ital., Vol 53, fasc.2.*
- POCACHARD J. (1977) - Application du magnétomètre différentiel à double résonance nucléaire à la prospection minière sur des gîtes métallifères alpins. *Thèse Spécialité, Grenoble.*
- POCACHARD J. (1978) - Prospection aéromagnétique sur des gisements de magnétite au Sud d'Aoste (Italie). *Note LETI/MA n° 1288, Grenoble.*
- POCACHARD J. (1980) Structures de la roche et effets magnétiques. Mesures et interprétation. *Thèse Etat, Grenoble.*

- RAMDOHR P. (1969) - The ore minerals and their intergrowths. Pergamon Press.
- RANKAMA K. and SAHAMA T.G. (1949) - Geochemistry. The University of Chicago Press.
- RASS I.T. (1972) - Behavior of the rare earth elements and Ytrium during magmatic metasomatism of ultramafic rocks. *Geoch. Intern., Vol. 9, n° 1.*
- REEDMAN J.A. (1979) - Techniques in mineral exploration. Applied Science Publishers.
- REKHARSKIY V.I. (1964) - Periodicity of the coefficient of concentration and the distribution of the elements in igneous rocks. *Doklady Akad. Nauk SSSR, Vol. 156, p. 164-167.*
- RICHARD A. (1981) - Le district aurifère de Challant(Val d'Aoste, Italie) : Gîtologie, géochimie et métallogénie de l'or. *Thèse Spécialité, Grenoble.*
- RINGWOOD A.E. (1955) - The principles governing trace elements distribution during magmatic crystallisation.
Part 1. *Geoch. Cosmo Acta*, 7, pp. 189-202.
Part 2. The rule of complex formation. *Geoch. Cosmo. Acta*, 7, pp. 242-254.
- ROGER G. et TREUIL M. (1976) - Quelques réflexions sur la géochimie non isotopique des corps minéralisés et de leur enveloppe. *Mém. Hors série Soc. Géol. de France, n°7, pp. 189-212.*
- ROULADOU J., PICOT P. et LAFORET C. (1976) - Les gisements sulfurés stratiformes liés au volcanisme, quelques réflexions sur l'environnement et la minéralogie des minerais. *Mem. hors série, n°7, Soc. Géol. France, section II.*
- ROUTHIER P. (1963) - Les gisements métallifères. T.1 et 2, Masson et Cie.
- ROUTHIER P. (1980) - Où en sont les métaux pour l'avenir ? Les provinces métalliques. *Essai de métallogénie globale. Mémoire du BRGM, n° 105.*
- RUCKLIDGE J. (1971) - Mobilisation of nickel and platinum metals during serpentinization of ultramafic rocks . *Platinum conference, Univ. Melbourne*
- SATO M. and MOONEY H.M. (1960) - The electrochemical mechanism of sulfide self potentials. *Geophysics* 35, pp. 226-249.
- SEGUIN K.M. (1971) - La géophysique et les propriétés physiques des roches. *Les Presses de l'Université Laval.*
- SHCHEKA S.A., PYATKOV A.G., VRZHOSEK A.A., LEVASHEV G.B. and OK-TYABR'SKIY R.A. (1978) Trace elements parageneses in magnetite. *Geoch. Intern., Vol. 15, n°3.*
- SHTERENBERG L.Y., BELOVA L.V., MOTUZOVA G.V. and CHERKASOVA (1966) - Ga, Ge, Pb, Zn, W and Mo in manganese ores of the Chiatura and other giorgian deposits. *Doklady Akad. Nauk SSSR, Vol. 173, pp. 187-189.*

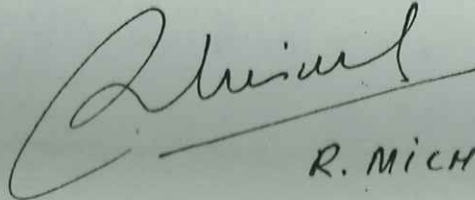
- SHTEYNBERG D.S. and MALAKHOV I.A. (1964) - Behavior of iron during serpentinization. Doklady Akad. Nauk. SSSR, Vol. 156, pp. 158-160.
- SILVY J. (1980) - Etude structurale de milieux fibreux. Thèse Etat, Grenoble.
- SHAW D.M. and BANKIER J.D. (1954) - Statistical methods applied to geochemistry. Geoch. Cosmo.Acta, Vol. 5, pp. 111-123.
- STELLA A. (1931) - Intorno a nuovi studi sui giacimenti piritoso cupriferi della zone delle pietre verdi alpine. Boll. Soc. Geol. Ital. , Vol. L, fasc. 1.
- TOLSTOY M.L., ZHUKOV N.N. and OSTAFIYCHUK I.M. (1972) - Quantitative evaluation and the spatial distribution of elements in magmatic formations. Geoch. Intern., Vol. 9, n°1.
- TYULENEV A. Ye. (1968) - Associations of elements in residuum, as revealed by correlation analysis. Doklady Akad. Nauk, SSSR, Vol. 187, pp. 192-194.
- VIALON P., RULHAND M., GROLIER J. (1976) - Eléments de tectonique analytique. Masson, Paris.
- VINOGRADOV (1962) - Average contents of chemical elements in the principales types of igneous rocks of the earth's crust. Geochimistry, 7, pp. 641-664.
- WEDEPOHL K.H. (1969) - Hand Book of geochemistry, Springer-Verlag, Berlin.
- de WITTE L. (1948) - A new method of interpretation of self potential data. Geophysics 13, pp. 600-609.
- ZOLOYEV K.K. and SUDILOVSKIY G.N. (1967) - Quantitative variation in substance during serpentinization of peridotites. Doklady Akad. Nauk.SSSR, Vol. 177, pp. 227-230.
- ZUCCHETI S. (1978) - Remarks on the Nickel deposits of the Western Alps (Italy) 3ème Intern. Symp. on the Mineral Deposits of the Alps, pp. 529-534.

Dernière page d'une thèse

VU

Grenoble, le 1er septembre 1981

Le Président de la thèse

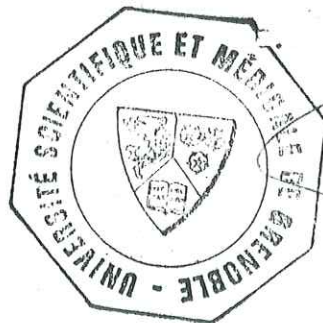

R. MICHEL

Vu, et permis d'imprimer,



Grenoble, le 18.09.81

Le Président de l'Université Scientifique et Médicale



Le Président,


J.J. PAYAN