

MATÉRIAUX POUR LA GÉOLOGIE DE LA SUISSE

Série Géotechnique, 57^e livraison

Publiés par la

Commission Géotechnique Suisse

L'Extension du Filon Pb-Zn de Goppenstein

(VALAIS - SUISSE)

Contribution à son Etude Géophysique et Géochimique

PAR

FRANÇOIS MOREL

EN COMMISSION

CHEZ KÜMMERLY & FREY, GEOGRAPHISCHER VERLAG, BERNE

1978

OFFSETDRUCK HELIOPRINT AG, ZÜRICH

PREFACE DE LA COMMISSION GEOTECHNIQUE SUISSE

La Commission Géotechnique Suisse a accepté dans sa séance du 28 janvier 1978 la thèse de M. François Morel dans les „Matériaux pour la Géologie de la Suisse, Série Géotechnique”.

Ses recherches concernant les gisements de galène et de blende de Goppenstein constituent un pas en avant vers une prospection moderne en géophysique et géochimie, recherche rarement employée en Suisse jusqu'à présent.

Cette prospection signale des indices de minéralisation plus étendus qu'on avait supposé.

La Commission remercie M. Morel de cette contribution intéressante et de sa participation aux frais d'impression.

Le fond du texte et des figures est laissé à la seule responsabilité de l'auteur.

Zurich, septembre 1978

Au nom de la
Commission Géotechnique Suisse
Le président: V. Trommsdorff

TABLE DES MATIERES

	Seite
Avant-propos	5
Resumé	6
Zusammenfassung	7
Abstract	8
But de l'étude	9
 Première partie	
Principe et mise en oeuvre de la méthode de polarisation spontanée. Etude de l'extension du filon à l'amont de Goppenstein. Cadre géologique et minéralogique.	11
Chapitre 1 – Le phénomène P.S.	11
1.1 Introduction	11
1.2 Le phénomène P.S. lié à des gîtes minéraux	11
1.3 Les phénomènes P.S. parasites	12
1.4 Origine du phénomène P.S.	13
1.5 Conclusion	14
Chapitre 2 – L'exécution des mesures	14
2.1 La méthode du „pas”	14
2.2 Autres méthodes	15
2.3 Le voltmètre	16
2.4 Les électrodes impolarisables	17
2.5 La „canette”	17
2.6 Les fils	18
2.7 Conclusion	20
Chapitre 3 – Le filon de galène et de blende de Goppenstein, dans le Lötschental (Valais, Suisse)	20
3.1 Introduction	20
3.2 Situation géographique	21
3.3 Bref historique de la mine	21
3.4 Cadre géologique	22
3.5 Affleurements du filon	24
3.6 Paragénèse du filon dans le Wilerbach et le Tennera	24
3.7 Présence d'argent et de molybdène	25
3.8 Présence de graphite près du filon	30
Chapitre 4 – Les mesures de polarisation spontanée	32
4.1 Introduction	32
4.2 La base générale de référence	33
4.3 Répartition des profils P.S.	34
4.4 Ecartement des mesures	34
4.5 Report des valeurs	35
4.6 Représentation des résultats	35
4.7 Interprétation d'un profil	37
4.8 Exemples de profils P.S.	39
4.9 Conclusion des chapitres 3 et 4	48
 Seconde partie	
Prospéction géochimique par échantillonnage de sols sur l'anomalie de polarisation spontanée.	50
Chapitre 5 – Considérations générales	50
5.1 Introduction	50
5.2 Situation des profils	51
5.3 La prise des échantillons	51
5.4 L'anomalie géochimique	54

Chapitre 6 – Analyses géochimiques des échantillons des profils Go I A Go V, situés entre Goppenstein et le Tennera, et comparaison des résultats de deux laboratoires	57
6.1 Introduction	57
6.2 Comparaison des résultats, élément par élément	58
6.3 Dédoublage d'échantillons	61
6.4 Anomalies géochimiques entre Goppenstein et le Tennera	66
6.5 Conclusion	69
Chapitre 7 – Absence de l'anomalie géochimique au nord-est de Schönbühl – prolongation de l'anomalie sur 4 km au nord-est du Tennera	70
7.1 Introduction	70
7.2 Région Schönbühl-Wilerbach: absence d'anomalie	70
7.3 Anomalies géochimiques à l'amont du Tennera	71
7.4 Conclusion	74
Chapitre 8 – Application aux échantillons des profils Go VI et Go VII, pour le dosage de Cu, Pb et Zn, de méthodes d'analyse semi-quantitative utilisées par le „U.S.Geological Survey”	75
8.1 Introduction	75
8.2 Préparation des échantillons	76
8.3 Matériel de base et produits chimiques	76
8.4 Principe des méthodes semi-quantitatives utilisées	78
8.5 Remarques sur les standards	78
8.6 Comparaison de nos résultats (laboratoire C) avec ceux des laboratoires A et B	80
8.7 Conclusion	82
Chapitre 9 – Corrélation entre les éléments chimiques analysés	83
9.1 Introduction	83
9.2 Résultats	84
9.3 Corrélation entre les anomalies de potentiel et les éléments chimiques analysés	85
Chapitre 10 – Conclusions générales	88
Références	92

Annexe: planches 1 et 2

AVANT - PROPOS

C'est à mon professeur, Monsieur C. Meyer de Stadelhofen, que je dois mon intérêt pour la géophysique appliquée. J'ai été séduit et influencé par son approche des problèmes, qui fait une place importante à l'intuition, au raisonnement, à l'expérience. Il m'a appris aussi à me méfier des a priori, à ne pas céder à une subjectivité excessive. Je lui exprime ma reconnaissance.

Je remercie mon ami P. Gex de sa collaboration; nos nombreux essais sur le terrain nous ont amenés à modifier le dispositif de mesure et à étudier le phénomène P.S. sous divers aspects. Son travail de thèse (La méthode de polarisation spontanée. Essai de réhabilitation) est un complément indispensable à mon texte.

J'exprime aussi ma reconnaissance à Monsieur M. Vuagnat, de l'Université de Genève, qui a traité statistiquement mes données géochimiques, ainsi qu'à Monsieur R. Olivier, professeur à l'Institut de Géophysique, grâce auquel ont pu être effectués le calcul et la représentation graphique des coefficients de corrélation.

Ma gratitude va à Monsieur G. Burri et à son collaborateur, Monsieur A. Mahé, de l'Institut de Physique expérimentale de l'Université de Lausanne, pour leur disponibilité et le travail minutieux qu'ils ont accompli dans la recherche de métaux et la détermination de minéraux à la microsonde.

Je sais gré à Madame A. Boulos, chimiste, de ses conseils et de son aide précieuse pour les analyses chimiques semi-quantitatives.

Mes remerciements vont encore à Monsieur F. Perret, dessinateur à l'Institut de Géophysique, pour le soin et la marque personnelle qu'il a apportés à la partie graphique, et à Madame L. Gilliéron pour son amabilité et la conscience avec laquelle elle a dactylographié mon texte.

Je suis sensible à l'honneur que m'ont fait Monsieur le professeur R. Woodtli, de l'Université de Lausanne, et Monsieur le professeur Th. Hügi, de l'Université de Berne, en acceptant d'examiner ce travail de thèse.

RESUME

Cette étude repose sur plus de 4'000 mesures de différences de potentiel (méthode de polarisation spontanée) et sur 500 prélèvements de sols analysés chacun pour cinq éléments: Cu, Pb, Zn, Ag et Mo.

Dans la première partie, nous rappelons le principe de la méthode et présentons un nouveau dispositif de mesure P.S., la „canette”: le déroulement d'un fil isolé très mince permet de laisser fixe l'électrode de référence et de faire une lecture directe du potentiel. Le choix de l'écartement des mesures, sans modifier la précision des résultats, est un autre avantage.

L'anomalie géophysique s'étend sur près de 13 km entre Goppenstein et le pied du Langgletscher, sur le versant gauche du Lötschental en Valais (Suisse). Les chutes de potentiel atteignent le plus souvent -600 à -900 mV; on ne peut cependant savoir qui, des sulfures ou du graphite (déterminé par la microsonde dans les roches encaissantes du filon), en est à l'origine.

Dans la seconde partie, nous examinons les résultats d'analyse de 500 échantillons de sols prélevés dans la zone anormale P.S.: d'une part pour les commenter en fonction de leur situation sur le terrain et de leur correspondance avec les anomalies géophysiques, d'autre part pour comparer les résultats d'analyse quantitative de deux laboratoires étrangers, l'un anglais, l'autre canadien, qui ont tous deux utilisé l'absorption atomique.

L'application d'une méthode d'analyse semi-quantitative sur des échantillons de sols traités aussi par les deux laboratoires nous permet de comparer les trois séries d'analyses pour trois éléments (Cu, Pb, Zn) et de discuter de la fiabilité de telles méthodes.

L'ensemble des anomalies géophysiques et géochimiques est reporté sur deux cartes au 1:20'000.

ZUSAMMENFASSUNG

Diese Studie basiert auf über 4000 Potentialdifferenz-Messungen (Methode der spontanen Polarisation) und auf 500 Bodenproben, welche auf fünf Elemente (Cu, Pb, Zn, Ag, Mo) analysiert wurden.

Im ersten Teil wird das Prinzip der Methode beschrieben und ein neues SP-Messdispositiv (la „canette“) vorgestellt: das Ausrollen eines sehr dünnen isolierten Drahtes erlaubt eine fixe Referenzelektrode und die direkte Messung des Potentials. Die freie Wahl des Messabstandes, welche ohne Änderung der Messgenauigkeit möglich ist, ist insbesondere in gebirgigem Terrain ein weiterer Vorteil.

Die geophysikalische Anomalie erstreckt sich auf einer Länge von ungefähr 13 km zwischen Goppenstein und der Zunge des Langgletschers auf der linken Flanke des Lötschentales im Wallis (Schweiz). Die Potentialabfälle erreichen häufig Werte zwischen -600 bis -900 mV. Wir wissen jedoch nicht, ob die im Gestein mit der Mikrosonde nachgewiesenen Sulfide oder der ebenfalls vorhandene Graphit dafür verantwortlich sind.

Im zweiten Teil interpretieren wir die Analysenresultate von 500 Bodenproben, welche in der Zone der SP-Anomalien entnommen wurden: einerseits, um ihre Beziehung zur geophysikalischen Anomalie zu diskutieren, andererseits um die Resultate von quantitativen Analysen zweier ausländischer Laboratorien, eines englischen und eines kanadischen, vergleichen zu können, welche beide die Methode der Atomabsorption benutzten.

Die Anwendung einer semiquantitativen Analysenmethode durch die gleichen Laboratorien erlauben uns, drei Analysenserien zu vergleichen und die Zuverlässigkeit solcher Methoden zu diskutieren, und zwar für die Elemente Cu, Pb und Zn.

Die gefundenen geophysikalischen und geochemischen Anomalien sind auf zwei Karten im Massstab 1:20'000 dargestellt.

ABSTRACT

In this paper, we describe a geophysical and geochemical survey made in the area of the zinc-lead deposit of the Löttschen Valley (Valais, Switzerland).

This regional study is based on more than 4000 spontaneous polarization measurements and the analysis of five elements in 500 soil samples. The geophysical and geochemical anomalies found are given on two maps 1:20'000.

To carry out our SP measurements in the mountain environment, we had to develop a new instrumentation, easier to handle and more reliable than the usual one. The very strong anomalous voltages observed, down to -900 mV, can be attributed in part to the presence of sulfides and in part to graphite. Both kinds of mineralization were observed in rock samples with the help of a scanning electron microprobe quantometer.

The comparison of the geochemical results obtained by atomic absorption spectrometry in different laboratories is quite instructive. A simple semi-quantitative (field) method has also been compared with the more sophisticated atomic absorption.

Finally our work shows clearly that the improved SP method used in conjunction with some geochemical analyses can produce excellent results in many cases of preliminary prospection.

BUT DE L'ETUDE

La méthode de la polarisation spontanée appartient aux méthodes électriques de la géophysique appliquée à la prospection minière. On a coutume de l'abréger P.S. en français et S.P. en anglais (de self-potential method).

La simplicité du matériel en fait la méthode la plus rapide pour la prospection de certains gîtes métallifères et la mieux adaptée, avec de très faibles moyens, à toutes les régions d'accès difficile ou de relief prononcé.

Deux opérateurs suffisent pour effectuer plusieurs centaines de mesures par jour permettant une première étude, sommaire et rapide, d'une zone minéralisée, dont on peut assez vite déduire la direction, la profondeur et le plongement approximatifs.

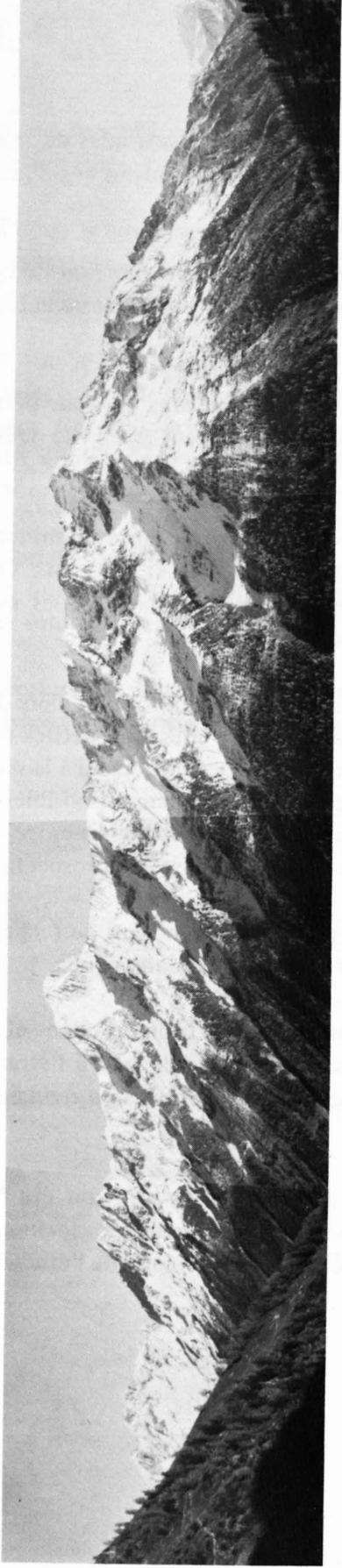
La faiblesse de cette méthode est de ne pouvoir déceler qu'un petit nombre de minerais (certains anthracites, le graphite, quelques sulfures) et de ne pouvoir les différencier entre eux. On lèvera l'indétermination par des observations géologiques, minéralogiques ou géochimiques avant d'entreprendre des travaux plus coûteux tels que forages ou tranchées.

La Suisse est riche en mines pauvres; s'il n'y a aujourd'hui aucune exploitation minière d'importance dans ce pays, les indices minéralisés sont nombreux dans les Alpes. Plusieurs petites mines ont été ouvertes au cours des siècles passés et exploitées, souvent épisodiquement, jusqu'à la seconde guerre mondiale. Mais les travaux semblent ne s'être localisés que sur les affleurements visibles, sans qu'une recherche systématique sur la prolongation éventuelle d'un filon ou sur la liaison entre divers indices n'ait été entreprise, faute, peut-être, de méthodes rapides et peu coûteuses de prospection.

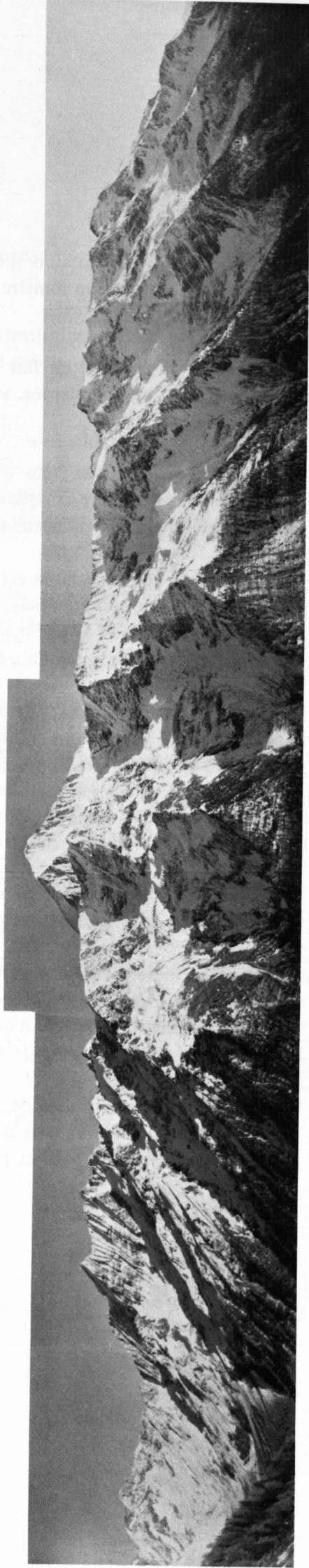
Depuis quelques années, plusieurs concessions ont été prises et des travaux de recherche souvent fort onéreux et trop localisés exécutés, sans que l'on fît appel à la géophysique.

Ce travail de thèse est l'étude systématique, par la méthode P.S., du filon de galène et de blende de Goppenstein en Valais, entreprise après de nombreux essais dans les Alpes et à l'étranger; ces premiers essais nous ont permis d'adapter la méthode à des terrains difficiles en rendant la prise des mesures plus souple, plus rapide et plus sûre.

Cette étude repose sur près de 12'000 mesures P.S., dont 4'000 environ ont été faites dans le Lötschental; 500 prélèvements de sols, représentant quelque 2'500 analyses géochimiques quantitatives, complètent ce travail et permettent une interprétation plus précise de l'étude géophysique.



VUES DU VERSANT SUD-EST DU LÖTSCHENTAL



PREMIERE PARTIE

Principe et mise en œuvre de la méthode de polarisation spontanée.

Etude de l'extension du filon à l'amont de Goppenstein.

Cadre géologique et minéralogique.

CHAPITRE 1 —

LE PHENOMENE P. S.

1.1 INTRODUCTION

L'observation montre l'existence, entre deux points quelconques du sol, de courants naturels, le plus souvent stables et continus dans le temps, créant une différence de potentiel que l'on peut mettre en évidence en reliant deux électrodes impolarisables, plantées dans le sol, à un voltmètre sensible. Ces potentiels se mesurent en millivolts (mV) et varient d'une fraction de mV à plusieurs mV par 10 mètres dans un terrain dit homogène, et de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de mV dans un terrain perturbé par la présence d'un corps polarisé.

Divers phénomènes sont à l'origine de différences de potentiels dans la nature. Les uns intéressent le géophysicien et sont dus à la présence, dans le sol, de certains corps conducteurs, le plus souvent des sulfures ou du graphite. Les autres le gênent: on les appelle électrofiltration, courants vagabonds et courants telluriques.

1.2 LE PHENOMENE P.S. LIE A DES GITES MINERAUX

Les plus forts gradients de potentiel, de l'ordre de plusieurs centaines de mV, se manifestent au-dessus des gîtes métallifères et sont, dans l'ensemble, négatifs par rapport à une référence située à l'extérieur de la minéralisation. Plusieurs sulfures (pyrite, pyrrhotine, chalcopyrite, chalcosine, covelline, galène), certains arséniosulfures ou antimoniosulfures complexes (POLDINI, 1947), le graphite et certains anthracites présentent de la P.S. Parfois des oxydes de manganèse et de fer, des minerais de cobalt, la sidérose, l'alunite et même des pegmatites donneraient une réaction P.S. (SATO et MOONEY, 1960).

Si les auteurs divergent quant à l'origine qu'ils attribuent à la P.S., ils s'accordent en revanche sur les observations suivantes:

- L'anomalie est négative à l'apex du corps minéralisé; certains auteurs, cependant, signalent de rares anomalies positives, notamment sur du graphite (WILCKENS, 1955).
- Le minerai doit être un bon conducteur électrique.
- Le graphite et la pyrite donnent les plus fortes réactions.
- La galène, bien qu'excellent conducteur et très oxydable, se couvre en surface d'une pellicule isolante de sulfate ou de carbonate de plomb, qui diminue ou stoppe le passage du courant et la réaction P.S.
- La minéralisation doit être électriquement continue, au-dessus ou au-dessous du niveau hydrostatique ou tout au moins entre partie haute et partie basse de la nappe dans laquelle elle baigne.
- Il faut la présence d'une zone d'oxydation, dans laquelle plonge une partie du corps.
- La réaction P.S. est faible sous les climats arides (niveau hydrostatique trop bas), dans les régions arctiques (trop haute résistivité des sols gelés) et dans les terrains où le niveau hydrostatique, trop proche de la surface, réduit fortement la zone d'oxydation.
- Le phénomène P.S. est stable dans le temps.

1.3 LES PHENOMENES P.S. PARASITES

Le potentiel d'électrofiltration est dû au passage de l'eau dans un milieu poreux et se manifeste surtout dans les terrains à fort relief. Une infiltration de l'eau „per descensum” peut provoquer une différence de potentiel de plusieurs dizaines de mV par 100 mètres et apparaît essentiellement sur les versants en „dip slope” ou sur les dépôts détritiques à grande porosité et perméabilité, tels que les cônes de déjection, qui favorisent l'écoulement de l'eau parallèlement à la pente. Bien qu'elle puisse donner naissance à de forts potentiels, l'électrofiltration n'est guère gênante: la chute du potentiel qu'elle provoque est régulière, elle marque une tendance locale épousant la topographie et ne modifie en rien une anomalie obtenue sur une minéralisation. Le sommet d'une colline ou d'un cône est toujours négatif par rapport à sa base.

La filtration „per ascensum” se manifeste par un faible potentiel positif là où elle est la plus forte.

Selon POLDINI (1947), le potentiel d'électrofiltration obéit à la loi suivante:

$$E = K \frac{D \cdot \Delta P}{4\pi\eta\sigma}$$

où ΔP est la chute de pression à travers la paroi, D la constante diélectrique du liquide, η son coefficient de viscosité et σ sa conductibilité spécifique. K est un coefficient caractéristique de l'électrolyte et de la nature chimique de la paroi.

Les courants vagabonds proviennent des fuites de courants continus ou alternatifs d'installations industrielles (lignes à haute tension, lignes de chemin de fer, etc.) et se signalent, lors des mesures, par de brusques à-coups ou par des vibrations de l'aiguille du voltmètre. Sur notre terrain, le courant alternatif de la ligne du Lötschberg s'est fait sentir jusqu'à 13 km de l'entrée du tunnel; il suit très probablement une zone graphiteuse conductrice.

Les courants telluriques sont liés à l'activité solaire. Ils parcourent de grands volumes de l'écorce terrestre et, malgré leur faible amplitude, peuvent rendre les mesures instables dans des terrains peu résistants.

D'autres paramètres physico-chimiques, tels que la résistivité électrique des roches et des sols, la composition chimique des électrolytes, la température, participent probablement aux phénomènes P.S. Ils constitueront le bruit de fond ou „background” de tout levé P.S.: il faudra en tenir compte lors de l'interprétation d'une anomalie sensu stricto.

1.4 ORIGINE DU PHENOMENE P.S.

Plusieurs auteurs ont tenté d'expliquer le phénomène P.S. SCHLUMBERGER (1920) et POLDINI (1938) en font une „pile à gaz”. Ils prennent comme exemple une lentille de pyrite enfouie dans le sol. Celle-ci subit l'action de l'oxygène dans sa partie supérieure très aérée, alors qu'en profondeur, au-dessous du niveau hydrostatique, l'oxygène ne se renouvelle pas. Il se crée une dissymétrie des électrolytes donnant naissance à un courant qui descend par le corps et remonte par le sol, libérant de l'hydrogène au sommet de la lentille; cet hydrogène se combine avec l'oxygène pour former de l'eau. Au bas de l'amas, il y a production d'oxygène, qui se dissout dans l'eau, pauvre en cet élément.

Si le corps est oxydable, l'effet de pile est renforcé et la dissymétrie des électrolytes maintenue par deux phénomènes: réduction, en surface, des oxydes du chapeau de fer par l'hydrogène; oxydation, en profondeur, du minerai par l'oxygène, qui ne se diffuse plus dans l'électrolyte.

Ainsi un minéral oxydable et une érosion rapide favorisent les fortes réactions de polarisation.

SATO et MOONEY (1960) font valoir d'autres arguments de nature électrochimique. Leur théorie se fonde sur les potentiels de réduction et d'oxydation (E_h , mesurés en volts) qui sont fonction de la tendance d'un élément à s'oxyder ou à se réduire (Fe^{++} , Fe^{+++} par exemple); ces différences de potentiels proviennent des électrolytes du sol en contact direct avec le corps minéralisé. Celui-ci ne participe pas directement à la réaction électrochimique mais sert uniquement de moyen de transport des électrons entre les agents oxydants et les agents réducteurs.

Les éléments participant à la création du courant doivent donc être abondants dans la nature.

Ainsi, dans la zone altérée, ce sont essentiellement les réactions de réduction de l'oxygène libre et du ion ferrique qui sont les plus fréquentes, tandis qu'au-dessous du niveau hydrostatique, on trouvera probablement les réactions d'oxydation des ions ferreux, de l'hydroxyde et du ion bisulfure. Les réactions créent une addition, vers le sommet, de charges négatives entraînant, pour le maintien de l'équilibre de la demi-pile, l'augmentation, dans la solution, de ions positifs ou la diminution de ions négatifs. En profondeur, c'est l'inverse.

Pratiquement, tous les ions peuvent participer à la conduction ionique. En fait, ce sont surtout les ions H^+ et OH^- .

Cette théorie implique quatre conditions géologiques:

- Le minerai doit être bon conducteur électrique.
- Il doit être continu au travers des solutions de potentiel d'oxydation différent.
- Il doit être stable ou inerte chimiquement.
- Il ne doit pas se couvrir, en surface, d'un film isolant.

1.5 CONCLUSION

Si la théorie de Sato et Mooney a le mérite d'apporter de nouveaux éléments, de nature électrochimique, sur la genèse de la P.S. et si elle est beaucoup plus précise que toutes les précédentes, elle ne résout pas le problème de l'amplitude de l'anomalie que l'on observe sur le terrain. Selon les auteurs, l'anomalie sur du graphite ne devrait pas dépasser -780 mV pour la cellule complète, c'est-à-dire -390 mV par rapport à une référence à l'infini, alors que l'observation montre fréquemment des anomalies dépassant -500 mV et parfois 1 volt. Il faudrait donc faire appel à d'autres conditions chimiques ou à l'addition de potentiels non liés au corps.

CHAPITRE 2 –

L'EXECUTION DES MESURES

Le matériel de base, nécessaire à la mesure d'une différence de potentiel, est simple: deux électrodes impolarisables, un voltmètre sensible et les fils isolés reliant les électrodes au voltmètre. Nous reviendrons plus loin sur la description de ces instruments; examinons d'abord le mode d'avancement sur le terrain (cf. figure 1).

2.1 LA METHODE DU „PAS”

La méthode du „pas” consiste à déplacer l'ensemble du dispositif d'une longueur ℓ fixe, correspondant à la distance séparant les électrodes (écartement des mesures). Dans le sens de la marche, l'électrode arrière est appelée „électrode de référence”, l'électrode avant „électrode de tête” ou „électrode de mesure”. C'est entre ces deux électrodes qu'est mesurée la différence de potentiel positive ou négative. A la mesure suivante, le dispositif entier se déplace de la longueur ℓ ; la référence vient dans le trou de l'électrode de tête, et ainsi de suite.

Deux opérateurs effectuent les mesures: l'un, au voltmètre, fait le trou dans lequel il enfonce l'électrode puis mesure la différence de potentiel, l'autre note la valeur, indique l'altitude et l'emplacement de la station.

Résultats:

La méthode du „pas” implique le changement de référence à chaque mesure et la lecture d'un gradient de potentiel. Or, l'intérêt est de connaître le potentiel de toutes les stations par rapport à une référence unique, en principe la première du profil. Pour l'obtenir, il faut, avec la méthode du „pas”, cumuler, c'est-à-dire ajouter algébriquement, en tenant compte du signe, toutes les valeurs qui sont alors rapportées à une seule référence: le „zéro” du profil.

Si l'on revient au point de départ, on s'aperçoit, après le cumul des valeurs, qu'il existe une erreur de fermeture, positive ou négative, dont les causes sont nombreuses:

- 1^o) Les électrodes présentent toujours une dissymétrie variant de quelques dixièmes de mV à plusieurs mV. Cette dissymétrie a pour origine des différences de remplissage et de contact cuivre-solution, de température et de porosité des électrodes. Si l'on admet que cette dissymétrie est constante et seule cause de l'erreur de fermeture, il est facile de répartir les écarts. Ce serait une solution pratique mais qui ne correspondrait pas à la réalité, puisque la dissymétrie des électrodes varie dans le temps et peut changer de signe, et qu'elle n'est pas forcément la seule cause d'erreur.
- 2^o) Un mauvais contact de l'électrode avec le sol, trop sec ou trop saturé en eau, risque de provoquer une erreur importante.
- 3^o) L'opérateur peut s'être trompé dans la lecture du signe ou de l'échelle d'une ou plusieurs valeurs.

Du fait du grand nombre possible des causes d'erreur, il est souvent préférable de conserver les valeurs cumulées sans correction.

Défauts de la méthode du „pas”:

Même si les valeurs ne sont pas corrigées, la méthode du „pas” exige un retour au point de départ, au moins une fois par jour. C'est évidemment une lourde servitude.

Le déplacement, à chaque mesure, de la référence est une source d'imprécisions, bien que l'on prenne soin de reprendre à chaque fois le trou préparé pour l'électrode de mesure. D'autre part, le cumul des résultats, en fin de journée, prend beaucoup de temps.

La rigidité de ce dispositif ne permet guère d'espacer les mesures selon le terrain ou les résultats obtenus: il devient en effet impossible de traverser des éboulis ou une zone d'affleurement si leur extension dépasse l'écartement des mesures.

Enfin, le fil, à force d'être traîné, perd son isolation et devient une source de P.S. parasites.

2.2 AUTRES METHODES

Afin d'éliminer certains risques d'erreurs, on peut appliquer plusieurs variantes du dispositif du „pas”. Par exemple, il est possible d'inverser le dispositif après chaque mesure, l'électrode de référence pivotant autour de l'électrode de tête et inversement. La référence ne change ainsi qu'une fois sur

deux, diminuant l'erreur possible due au contact sol-électrode. Lors des calculs, il faut inverser le signe des valeurs une fois sur deux, chaque fois que la référence passe en tête du dispositif. Ce procédé est inapplicable hors des chemins ou des terrains plats sans végétation.

Toujours avec ce même dispositif, on peut „filer l'équipotentielle”: par tâtonnement, on recherche une différence de potentiel nulle à partir de points cotés 0, -50, -100 mV par exemple.

Ou bien, à partir d'un point central, il est possible d'effectuer quatre mesures perpendiculaires si l'on veut établir une maille régulière. La référence, dans ce cas, se déplace moins souvent.

Il existe aussi des bobines de plusieurs centaines de mètres de fil, dont l'une des extrémités est fixée à la référence et l'autre, sur la bobine, à une prise à laquelle se branche le voltmètre. Ce câble est bagué tous les 5, 10, 15 ou 20 mètres pour l'écartement des mesures; la référence ne change qu'une fois la bobine déroulée et se replace à la dernière mesure du premier tronçon.

Ce procédé a l'avantage de ne déplacer que rarement la référence, de ne pas traîner le fil sur le sol et de permettre un choix dans l'écartement des mesures. Si la bobine est à conseiller dans les régions habitées ou encore pour exécuter un levé à mailles serrées, elle est en revanche difficile à utiliser sur de forts reliefs à cause de son poids et du rebobinage du fil.

Enfin, pour pallier ces désavantages de la bobine, nous avons élaboré un système où le fil se déroule „à l'infini”. L'électrode de référence reste fixe, même s'il y a changement de bobine. Le fil utilisé est un fil de cuivre isolé très mince, enroulé sur une bobine. Nous avons donné le nom de „canette” à ce dispositif que nous décrivons avec le matériel P.S.

2.3 LE VOLTMETRE

Le voltmètre utilisé lors de toutes nos prospections – souvent appelé potentiomètre P.S. – a été construit par le laboratoire de l'Institut de Géophysique de l'Université de Lausanne. Sa caractéristique principale est une très haute impédance d'entrée, supérieure à mille mégohms, qui permet, sans risque d'erreur, des mesures dans des terrains très résistants.

Cet appareil, dont le poids est d'environ 1'200 grammes et les dimensions de 12 x 17 x 10,5 cm, comporte:

- deux prises pour l'entrée des fils reliés aux électrodes, dont l'une est la référence R,
- un interrupteur général,
- un inverseur pour les lectures positives ou négatives,
- un commutateur permettant la lecture de la valeur sur quatre échelles différentes, graduées en 33, 100, 333 et 1'000 mV.

2.4 LES ELECTRODES IMPOLARISABLES

L'électrode traditionnelle est un pot en porcelaine à fond poreux, rempli de solution sursaturée de sulfate de cuivre (CuSO_4) dans laquelle plonge une tige de cuivre pur. La partie poreuse permet à la solution de passer dans le sol, donnant la chaîne galvanique suivante entre les deux électrodes A et B:

Cu (A) – solution CuSO_4 sursaturée (A) – électrolyte du sol – solution CuSO_4 sursaturée (B) – Cu (B).

Ces électrodes sont dites impolarisables par opposition à des électrodes métalliques qui, plongées dans un électrolyte hétérogène, se chargent électriquement en créant une polarisation parasite due au métal et non au sol.

Celles que nous avons utilisées lors des premières prospections mesurent 10 cm de hauteur pour un diamètre extérieur de 5,3 cm.

Les nouvelles électrodes sont plus longues, plus étroites et plus solides que celles en porcelaine, de façon que l'on puisse les enfoncer directement dans le sol. Nous en avons conçu deux types, représentés schématiquement sur la figure 1.

L'électrode de mesure: du bois constitue la partie poreuse de l'électrode et remplace la porcelaine poreuse. Il est enfoncé, collé et chevillé dans un tube en PVC de 25 cm de long et de 2,5 cm de diamètre, qui forme le réservoir de la solution de CuSO_4 sursaturée. L'électrode est fermée par un bouchon en caoutchouc au travers duquel passe la tige de cuivre, dont on isole la partie supérieure pour éviter les fluctuations de contact.

Un étui en PVC permet d'enfermer l'électrode à la fin des mesures pour l'empêcher de se vider ou de se dessécher.

Les électrodes, légères et incassables, ont une longueur de 33 cm; la même paire a résisté à près de 12'000 mesures.

L'électrode de relais: la figure 1 montre un second type d'électrode. En fait, elle n'est conçue que comme électrode de secours et n'est que rarement utilisée, d'où sa simplicité et sa moins bonne isolation. En effet, le PVC est remplacé par un tube de cuivre, rempli de CuSO_4 . Le contact se fait à l'extérieur par un fil soudé sur le tube. Cette électrode de relais peut être abandonnée sur place.

La figure 1 schématise le matériel P.S. tel que nous l'avons modifié et utilisé lors de nos prospections dès 1974. Il comprend le voltmètre et les nouvelles électrodes, la „canette” et la boîte de compensation.

2.5 LA „CANETTE”

Entre l'électrode de référence et le voltmètre vient s'intercaler la „canette”. Une bobine de 8 cm de diamètre et de hauteur est fixée à l'intérieur d'un cylindre guide; elle supporte plus de 3'500 mètres de fil de cuivre isolé de 0,2 mm de section. L'une des extrémités du fil est reliée au voltmètre, l'autre est attachée à l'électrode de référence.

Lors des déplacements pour les mesures, la bobine se dévide lentement selon le principe d'une canette de machine à coudre, et le fil se pose sur le sol. La référence reste fixe, même lors du changement de bobine. Il suffit de relier bout à bout les deux fils pour la poursuite des mesures.

Avantages de la „canette”:

Puisque la longueur du fil n'est plus limitée, l'électrode de référence reste fixe durant tout l'établissement du profil. Il n'y a plus de cumul des valeurs ni d'erreur de fermeture. Si l'on revient à la base, le potentiel est par définition nul ou n'excède pas les quelques mV de la dissymétrie des électrodes. La lecture du potentiel est directe et toutes les mesures se lisent par rapport au même zéro.

Le déplacement d'une seule électrode permet de varier l'écartement des mesures à volonté. Lorsque les différences de potentiel sont faibles, on espace les mesures tous les 30, 50 ou 100 mètres. Au contraire, si le gradient augmente à l'approche d'une zone anormale, on rapproche les mesures tous les 10, 5 ou 1 mètres, sans pour cela modifier la précision des résultats. Doit-on traverser des éboulis secs ou une zone d'affleurements, où les mesures seraient mauvaises, il suffit de sauter la zone, pour reprendre celle-ci sitôt le terrain favorable.

Il arrive fréquemment, en montagne, que le fil soit cassé par un être humain ou par un animal. Il est nécessaire de poursuivre les mesures sans devoir retourner à l'électrode de référence, qui peut se trouver à plusieurs kilomètres de distance ou à des centaines de mètres de dénivellation. L'électrode de relais va servir de nouvelle référence; elle est placée dans le trou de la dernière mesure et, comme ce point n'est pas, en général, au même potentiel que la référence de départ, on intercale entre le voltmètre et la „canette” une boîte de compensation (cf. figure 1), faite d'une pile de 1,5 V, d'un potentiomètre et de deux prises d'entrée. Cette boîte sert à remettre la nouvelle référence au potentiel de la dernière valeur mesurée. Ainsi, la correction se fait au moment du changement de référence et tous les potentiels suivants se liront par rapport à la référence de départ.

Défauts de la „canette”:

Le fil, de par sa finesse, ne peut être rebobiné et réutilisé. On est obligé de l'abandonner sur place. Dans les régions habitées, c'est, bien sûr, un inconvénient: il faut parfois le récupérer. A Chizeuil, en France, lors d'une prospection-test sur des lentilles de pyrite, il a fallu le ramasser par suite de la plainte d'un paysan, qui nous accusait de porter atteinte à son bétail. Au Zaïre, dans une région assez peuplée, le fil était trop souvent cassé, volontairement ou non, par les habitants. Il ne s'agissait, cette fois, ni de pollution ni de santé du bétail, mais de curiosité ou de coquetterie: une Noire n'exhibait-elle pas le collier qu'elle s'était ainsi confectionné!

Il est préférable, dans ces situations, de renoncer à la „canette” et d'utiliser une bobine de fil plus solide et mieux visible, quitte à faire des mesures plus lentes et à porter un matériel plus lourd.

2.6 LES FILS

Dans la méthode du „pas” et ses variantes, chaque électrode est reliée au voltmètre par un fil électrique bien isolé, souple, résistant à la traction et au frottement. En pratique, l'une des électrodes est à proximité immédiate du potentiomètre, l'autre à une distance fixe déterminant l'écartement des mesures.

Schéma du matériel P.S. avec canette et nouvelles électrodes.

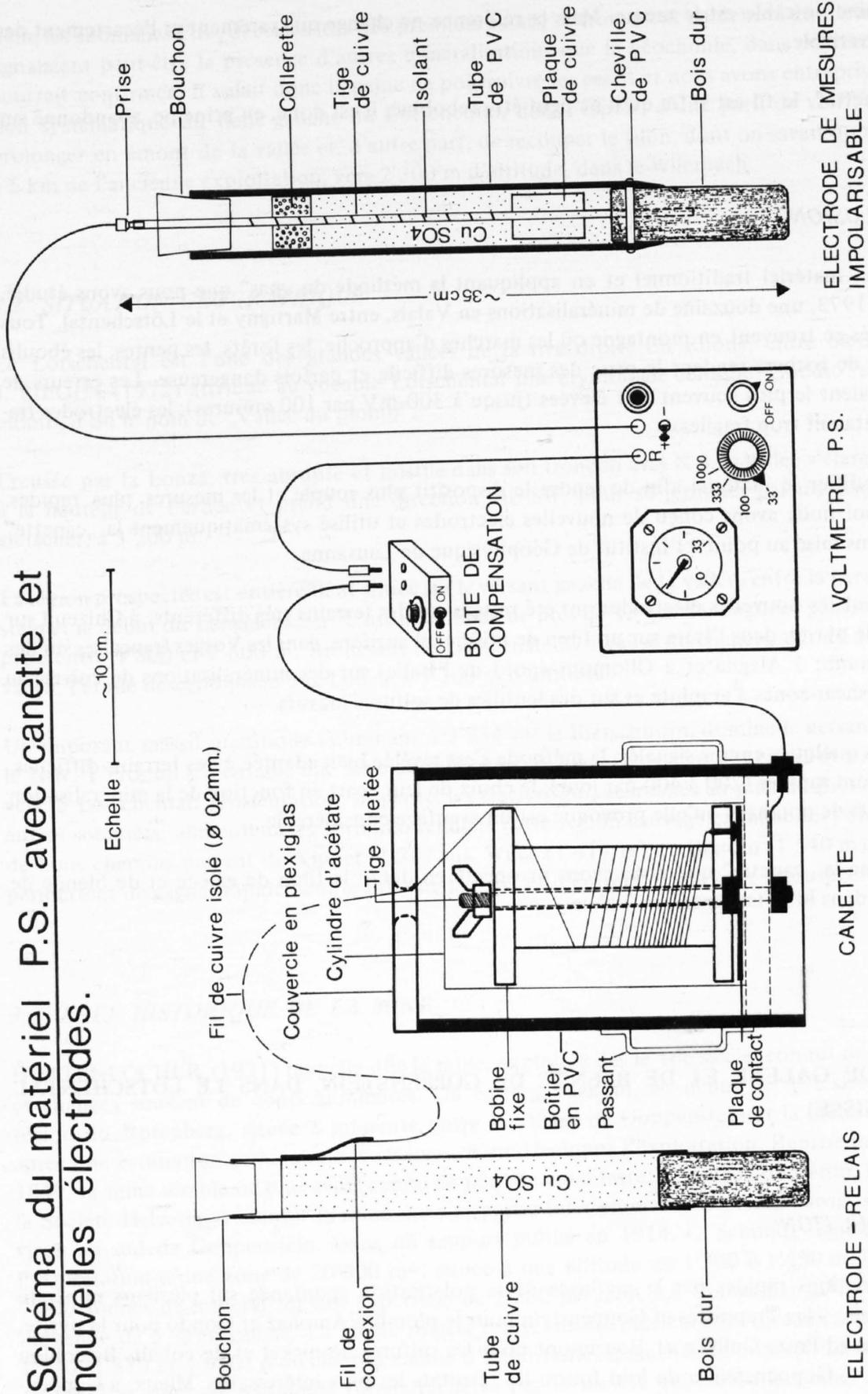


Figure 1

Avec la bobine, le câble est le même. Mais la référence ne change que rarement et l'écartement des mesures est variable.

Pour la „canette”, le fil est si fin qu'il ne peut être rebobiné; il est donc, en principe, abandonné sur place.

2.7 CONCLUSION

C'est avec un matériel traditionnel et en appliquant la méthode du „pas” que nous avons étudié, durant l'été 1973, une douzaine de minéralisations en Valais, entre Martigny et le Lötschental. Tous les cas étudiés se trouvent en montagne où les marches d'approche, les forêts, les pentes, les éboulis et les parois de rochers rendent la prise des mesures difficile et parfois dangereuse. Les erreurs de fermeture étaient le plus souvent très élevées (jusqu'à 300 mV par 100 mesures); les électrodes traditionnelles étaient trop fragiles.

Il a fallu modifier le matériel afin de rendre le dispositif plus souple et les mesures plus rapides. C'est pourquoi nous avons conçu de nouvelles électrodes et utilisé systématiquement la „canette” que nous avons mise au point à l'Institut de Géophysique de Lausanne.

La „canette” et les nouvelles électrodes ont été testées sur des terrains très différents: à Chizeuil sur des lentilles de pyrite, dans l'Isère sur un filon de mispickel aurifère, dans les Vosges françaises sur des indices de plomb; à Alagna et à Ollomont (nord de l'Italie) sur des minéralisations de cuivre; au Zaïre sur des shear-zones à graphite et sur des lentilles de sulfures massifs.

En dehors des quelques ennuis signalés, la méthode s'est révélée bien adaptée à des terrains difficiles. Les mesures sont rapides (200 à 400 par jour); le choix de leur écart en fonction de la minéralisation et des gradients de potentiel qu'elle provoque est un avantage considérable.

C'est aussi avec la „canette” que nous avons prospecté en détail le filon de galène et de blende de Goppenstein, dans le Lötschental, en Valais.

CHAPITRE 3 –

LE FILON DE GALENE ET DE BLENDE DE GOPPENSTEIN, DANS LE LÖTSCHENTAL (VALAIS, SUISSE)

3.1 INTRODUCTION

Lors de prospections rapides par la méthode de la polarisation spontanée sur plusieurs minéralisations en Valais – les Trappistes et Goppenstein pour le plomb, l'Amonaz et Gondo pour la pyrite, Kaltenberg, Grand-Praz, Gollyre et Bourimont pour les sulfures de nickel et de cobalt, Baicolliou pour le cuivre –, Goppenstein a de loin fourni les résultats les plus intéressants. Mieux, à Goppen-

stein, les anomalies P.S., décelées lors des premiers essais, se trouvaient en dehors du filon exploité et signalaient peut-être la présence d'autres minéralisations que la géochimie, dans un stade ultérieur, pourrait confirmer. Il valait donc la peine de poursuivre les essais et nous avons entrepris la prospection systématique du flanc gauche du Löttschental, dans l'espoir, d'une part, de voir l'anomalie se prolonger en amont de la vallée et, d'autre part, de recouper le filon, dont on savait qu'il réapparaît à 5 km de l'ancienne exploitation, vers 2'300 m d'altitude, dans le Wilerbach.

3.2 SITUATION GEOGRAPHIQUE

Le Löttschental est l'une des grandes vallées de la rive droite du Rhône, entre Sierre et Viège. J. SIEGEN (1972) attribue au vocable Löttschental une étymologie celtique: „loudio” signifierait le plomb, d'où le nom de „Vallée du plomb”.

Creusée par la Lonza, très abrupte et hostile dans son tronçon aval N-S, la vallée s'élargit à l'amont, à la hauteur de Ferden et prend une direction NE-SW, pour se terminer par un glacier, le Langgletscher, à 3'200 m.

La région prospectée est entièrement située sur le versant gauche de la vallée, entre la gare de Goppenstein et le début du Langgletscher. C'est une bande de près de 13 km de longueur généralement comprise entre 1'800 et 2'600 m. Au-dessus de Goppenstein, à cause du changement de direction de la vallée, l'étude descend jusqu'à la Lonza, à 1'200 m d'altitude.

Un imposant massif granitique culminant à 3'934 m, le Bietschhorn, domine le versant orienté vers le N-W. L'érosion y a entaillé une série de vallons parallèles, séparés par des crêtes étroites plongeant vers le Löttschental. L'orientation, la pente, les glaciers qui, accrochés au pied du Bietschhorn et des autres sommets, alimentent les torrents, rendent cette région sauvage et inhabitée; on y accède par de bons chemins partant de Kippel (1'347 m), Wiler (1'419 m) ou Blatten (1'540 m). Ces chemins permettent de gagner rapidement le faite de la forêt et d'entrer dans la zone à prospecter.

3.3 BREF HISTORIQUE DE LA MINE

HUTTENLOCHER (1931) rappelle que la mine, exploitée dès le 16e siècle, connut des succès divers et changea souvent de concessionnaires. Un certain Baglioni, au début du 19e siècle, exploita la région du Rotenberg, située à mi-pente entre le village de Goppenstein et la crête de Schönbühl; après une estimation sommaire des réserves, il en développa l'exploitation. Reprise maintes fois dès 1849, la mine semble ne plus avoir connu de période aussi faste. R. Tiebel, de Berlin, fonda en 1902 la Société Helvetia et étendit la mine dans sa partie inférieure, à la base des parois, 400 mètres environ au sud de Goppenstein. Dans un rapport publié en 1914, C. Schmidt signale l'ouverture à l'exploitation d'une zone de 20'000 m², située à une altitude de 1'300 à 1'450 m; il en fut extrait 7'000 tonnes de minerai sur une superficie de 2'500 m², soit 2,8 tonnes par m², avec une teneur moyenne de 5 % en galène. La même société reprit ensuite plusieurs des niveaux supérieurs (1'690, 1'720, 1'870 et 1'910) d'où elle tira encore d'importantes quantités de minerai. La mine fut fermée en 1907 et tous ses bâtiments furent rachetés par la société qui creusa le tunnel du Löttschberg.

Nous savons que la mine fut rouverte pendant la seconde guerre mondiale par le Valaisan Dionisotti. Seules 50 tonnes de minerai en furent extraites et des filons de quartz y furent exploités.

Enfin, de 1972 à 1974, le B.R.G.M. reprit la concession et procéda à un échantillonnage des niveaux 1'860, 1'820 et 1'310 (galerie Dahl). L'objectif des 64 prélèvements totalisant près de 2'000 kg était de mettre à jour des réserves se montant à deux millions de tonnes de minerai à 7 % de Pb + Zn. Cet objectif n'a pas été atteint et le B.R.G.M. renonça à la concession.

3.4 CADRE GEOLOGIQUE

Presque tout le Lötschental est taillé dans les schistes cristallins de la partie W du massif de l'Aar. Le pendage des couches varie, en moyenne, de 60 à 70 degrés vers le S-W; leur direction est donc parallèle à la vallée dans sa partie supérieure, tandis que les couches la traversent obliquement dans son tronçon N-S.

Cette couverture métamorphique est une épaisse série où alternent schistes et gneiss à chlorite, gneiss à biotite, gneiss granitoïdes, gneiss, oeilles amphibolites et parfois aussi roches granitiques. Une carte géologique du Lötschental au 1:25'000, levée par le professeur Th. Hügi, de l'Université de Berne, et par le Dr. H. Ledermann, est en cours de publication.

Dans sa thèse parue en 1945, H. LEDERMANN a déjà établi dix coupes pétrographiques au 1:10'000. Nous reproduisons, en partie, cinq de ces profils situés entre Schönbühl (Kleealp) et le Langgletscher (Distelberg) (cf. figure 2). Celui du Tennera passe au milieu de notre zone d'étude, entre 1'600 et 2'500 m.

Ces coupes montrent les différents types de roches et leur alternance dans la zone que nous avons prospectée par la géophysique. D'une coupe à l'autre, l'ordre des variations change, mais l'ensemble est conservé. Il est important de noter la présence de plusieurs niveaux à graphite assez épais, entre 2'200 et 2'400 m. Ces niveaux se retrouvent sur les cinq profils environ à la même altitude et semblent bien correspondre à la zone d'affleurement du filon de galène. Il faut remarquer que, dans le Wilerbach, le graphite est associé au filon, alors que, dans le Tennera, la galène se trouve en dehors de la zone graphiteuse.

Figure 2 – Légende (traduite de l'allemand)

- | | |
|--|--|
| 1 : gneiss à plagioclase et biotite | 12 : gneiss rubané d'aspect lenticulaire |
| 2 : gneiss à plagioclase, biotite, séricite et chlorite | 13 : aplitite |
| 3 : gneiss à plagioclase, biotite et parfois graphite | 14 : pegmatite |
| 4 : schistes à séricite et chlorite, avec des carbonates | 15 : granitoporphyre et quartzporphyre |
| 5 : gneiss à plagioclase et biotite, d'aspect „kinzigitique”, mélanocrates | 16 : lamprophyre et porphyrite |
| 6 : „flasergneiss” à plagioclase, biotite et chlorite | 17 : amphibolite, en partie à grenat, et hornblendite |
| 7 : gneiss rubané à plagioclase et biotite | 18 : amphibolite schisteuse et schistes à amphibole et zoisite |
| 8 : gneiss rubané à chlorite | 19 : amphibolite à grenat |
| 9 : gneiss aplitique à plagioclase et biotite | 20 : gneiss à hornblende (amphibolite à feldspath) |
| 10 : gneiss granitique à plagioclase et biotite | 21 : roches syénitiques (à amphibole ou à biotite) |
| 11 : gneiss à plagioclase, biotite et porphyroblastes de feldspaths alcalins | 22 : serpentine, pierre ollaire et schistes à actinote |
| | 23 : schistes à séricite et graphite, d'aspect phyllitique |

Extraits de coupes pétrographiques d'après H. Ledermann (1945)

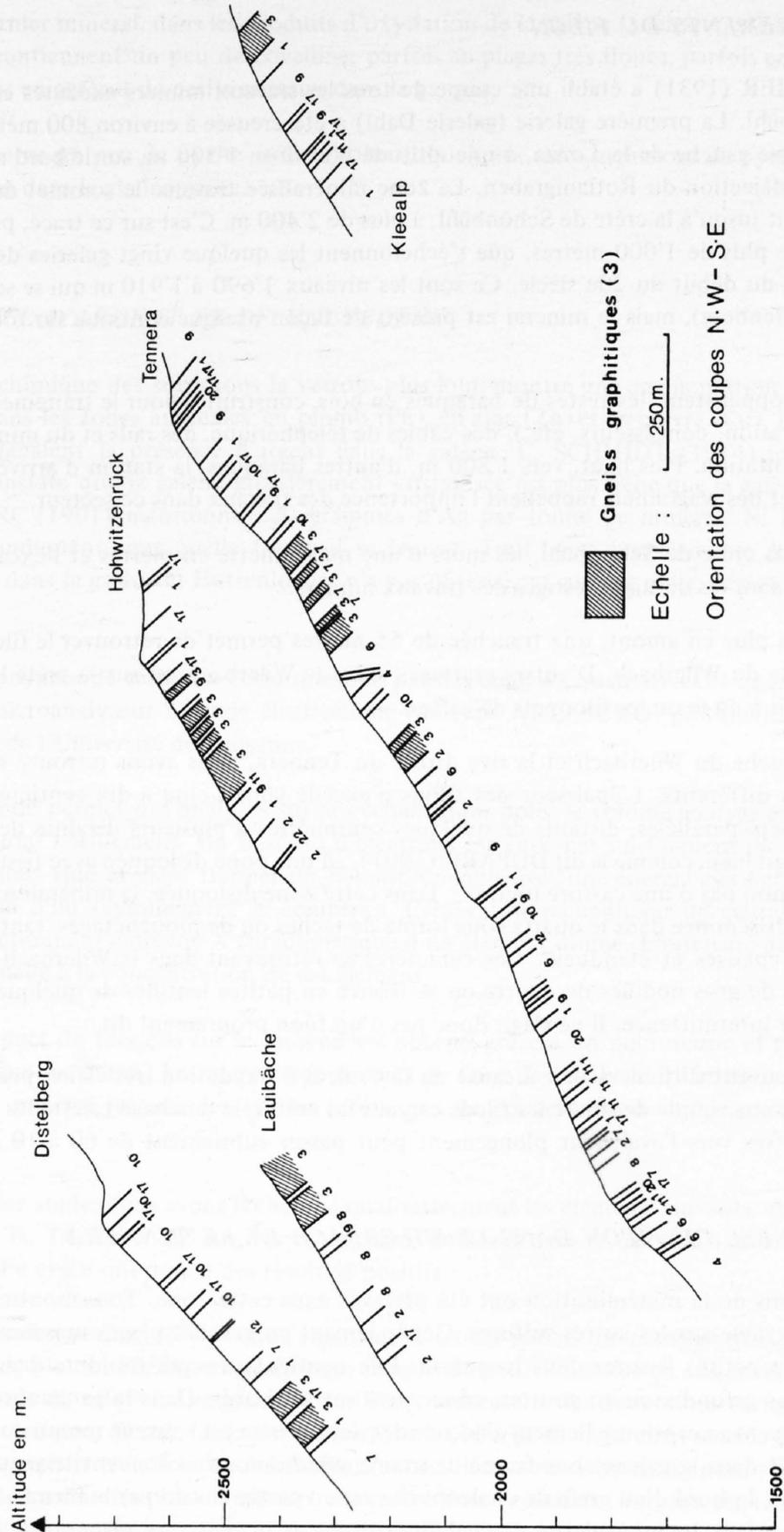


Figure 2

3.5 AFFLEUREMENTS DU FILON

HUTTENLOCHER (1931) a établi une coupe de tous les travaux miniers exécutés entre Goppenstein et Schönbühl. La première galerie (galerie Dahl) a été creusée à environ 800 mètres au sud du village, sur la rive gauche de la Lonza, à une altitude d'environ 1'300 m, sur le bord méridional du grand cône de déjection du Rotlauigraben. La zone minéralisée traverse le sommet du cône et suit un couloir étroit jusqu'à la crête de Schönbühl, à plus de 2'400 m. C'est sur ce tracé, présentant une dénivellation de plus de 1'000 mètres, que s'échelonnent les quelque vingt galeries des anciens travaux du 19e et du début du 20e siècle. Ce sont les niveaux 1'690 à 1'910 m qui se sont révélés les plus riches (Rotenberg), mais le minerai est présent de façon presque continue sur toute cette hauteur.

Au-dessus de Goppenstein, les restes de baraques en bois, construites pour le traitement du minerai (tables de séparation, concasseurs, etc.), des câbles de téléphérique, des rails et du minerai signalent l'ancienne exploitation. Plus haut, vers 1'800 m, d'autres baraques, la station d'arrivée du téléphérique, des rails et des wagonnets rappellent l'importance des travaux dans ce secteur.

Enfin, derrière la crête de Schönbühl, les murs d'une maisonnette en pierres et l'excavation superficielle du filon sont les derniers vestiges des travaux miniers.

Cinq kilomètres plus en amont, une tranchée de 55 mètres permet de retrouver le filon à 2'300 m, sur la rive droite du Wilerbach. D'autres grattages, dans le Wilerbach ou sur la crête le séparant du Tennera, ont mis à nu le ou les filonnets de galène.

Entre la rive gauche du Wilerbach et la rive droite du Tennera, nous avons retrouvé de la galène à quinze endroits différents. L'épaisseur des filons n'excède jamais cinq à dix centimètres. Souvent plusieurs filonnets parallèles, distants de quelques centimètres à plusieurs dizaines de mètres, confirment qu'il s'agit bien, comme le dit DUPARC (1901), „d'une zone disloquée avec fissures multiples et variables, et non pas d'une cassure unique". Dans cette zone disloquée, la minéralisation est capricieuse, „tantôt disséminée dans le quartz sous forme de taches ou de mouchetages, tantôt en lentilles plus ou moins épaisses et étendues". Ces caractères se retrouvent dans le Wilerbach, où la galène entoure parfois de gros nodules de quartz ou se trouve en petites lentilles de quelques centimètres apparaissant par intermittence. Il ne s'agit donc pas d'un filon proprement dit.

La galène est souvent difficile à voir à cause de sa couleur d'oxydation très claire, presque blanche. Il n'est pas toujours simple de suivre les filons car, sur les crêtes, le fauchage rejette les couches à des dizaines de mètres vers l'aval; leur plongement peut passer subitement de 60 à 10 ou 15 degrés.

3.6 PARAGENESE DU FILON DANS LE WILERBACH ET LE TENNERA

Onze échantillons de la minéralisation ont été prélevés dans cette zone. Tous montrent une prédominance de la galène sur les autres sulfures. Généralement en grandes plages massives, cette galène remplit aussi de petites fissures dans le quartz. Elle contient presque toujours des inclusions de blende en grains arrondis ou en gouttes, concentrés sur ses bords. Dans la gangue, ces grains sont craquelés et peuvent exceptionnellement s'accumuler; leur centre est souvent rempli de chalcopryrite. Celle-ci apparaît dans la galène sous forme de grains subidiomorphes souvent triangulaires ou très arrondis. Parfois, le bord d'un grain de chalcopryrite est en partie envahi par la blende. Ailleurs, c'est la blende qui contient des gouttelettes de chalcopryrite.

Près de ce dernier minéral, dans les produits d'oxydation de la galène (anglésite et cérusite), certains échantillons contiennent un peu de covelline, parfois en plages très floues, parfois en zones concentriques, parfois en agrégat de petits cristaux dans la gangue.

Enfin, on observe un peu de pyrite automorphe et quelques rares inclusions de pyrrhotine associée ou en inclusion dans la chalcopyrite.

3.7 PRESENCE D'ARGENT ET DE MOLYBDENE

L'analyse géochimique des sols, nous le verrons plus loin, montre une augmentation de la teneur en argent (Ag) dans les zones anormales en plomb (Pb), en zinc (Zn) et en cuivre (Cu). Divers rapports de la mine signalent la présence d'argent dans la galène: C. SCHMIDT (1914) indique 0,030 à 0,036 % et constate que la galène grossièrement cristallisée est plus riche que la galène fine et compacte. DUPARC (1901) mentionne 220 grammes d'Ag par tonne de minerai. Ni l'un ni l'autre, cependant, n'indiquent sous quelle forme il se trouve. Tout laisse supposer que Ag remplace des atomes de Pb dans la galène et Huttenlocher n'a pas observé, en surface polie, des minéraux argentifères.

Il nous a été possible de résoudre cette question par des analyses qualitatives et quantitatives effectuées sur le microanalyseur à sonde électronique (de type ARL, SEMQ) de l'Institut de physique expérimentale de l'Université de Lausanne.

Cette microsonde permet des analyses sur des échantillons polis; le volume analysé est de l'ordre du micron cube (μm^3) seulement. Un faisceau d'électrons est émis par un filament en tungstène dans une chambre sous vide et vient frapper un échantillon-cible avec une énergie assez grande pour produire l'émission d'un rayonnement X complexe. Celui-ci est recueilli sur un cristal analyseur qui permet de sélectionner l'émission X caractéristique d'un élément donné. L'intensité du rayonnement est proportionnelle à la concentration de cet élément.

Le point d'impact du faisceau sur le minéral est observé grâce à un microscope et son image peut être agrandie sur un écran. La microsonde permet de faire des analyses quantitatives de plusieurs éléments d'un minéral jusqu'à des limites inférieures de concentration comprises entre 0,005 et 0,05 %.

Dans un premier stade, nous avons recherché qualitativement les éléments suivants: Ag, Pb, Mo, Cu, S, Fe, Sb, As, Ti, Tl, Zn et Al sur des échantillons prélevés dans le Wilerbach et le Tennera. Seuls Ag, Pb, Cu, S, Fe et Zn ont donné des résultats positifs.

Ce premier travail a permis de voir que l'argent ne se trouve jamais directement dans la galène, mais dans le sulfate de plomb (PbSO_4 , anglésite) qui remplit de petites fissures ou se concentre en grandes plages aux abords de celui-ci. Les grains argentifères présentent des dimensions variant de quelques μm à plusieurs centaines de μm , les grains ne sont jamais bien polis et fondent sous le faisceau d'électrons (il a fallu repolir trois fois un échantillon particulièrement riche en Ag pour s'assurer qu'il ne s'agissait pas de contamination). Toujours concentré dans le sulfate, l'argent est tantôt associé au soufre et au plomb, tantôt au cuivre et au soufre.

Nous avons ensuite analysé quantitativement plusieurs de ces grains pour 6 éléments: Zn, Cu, S, Fe, Ag et Pb. Le tableau 1 montre quatre analyses sur le grain particulièrement riche en Ag de la photo 1.

Tableau 1

	% en poids				% en atomes			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Cu	0,6	0,71	0,67	0,85	0,77	0,92	0,89	1,09
S	13,7	13,25	13,48	13,67	35	34,11	35,46	34,86
Zn	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe	0	0	0,7	0	0	0	0,11	0
Ag	83,22	82,95	78,92	82,58	63,2	63,47	61,72	62,59
Pb	2,59	3,76	4,47	3,7	1,02	1,5	1,82	1,46
Total	100,11	100,67	98,24	100,8	100			

Ces résultats sont très proches de la composition de l'argentite Ag_2S ; elle contient ici jusqu'à 4,47 % de plomb et un peu de cuivre (0,6 à 0,85 %). Ces deux éléments remplacent probablement l'argent, dont la teneur théorique est de 87,1 % en poids. Les photos 1 et 2 montrent l'aspect de l'argentite et la répartition de l'argent.

En plus de l'argentite, ce même échantillon (TM1), pris dans le Tennera, contient des grains très riches en cuivre, en soufre et en argent (photos 3, 4, 5 et 6). La surface ici est inhomogène et trop petite pour que l'on puisse se fier aux analyses faites sur l'un de ces grains; en effet, pour une même plage, les teneurs sont très variables d'une analyse à l'autre, comme le montre le tableau 2.

Tableau 2

	% en poids		% en atomes	
	1	2	1	2
Cu	49,17	22,68	41,88	26,38
S	26,96	16,16	45,51	37,24
Zn	0	0	0	0
Fe	0,16	0,06	0,16	0,08
Ag	22,27	50,86	11,42	34,84
Pb	3,92	4,1	1,02	1,46
Total	102,48	93,86	100	100



Photo 1:
grain d'argentite, Ag_2S , dans l'anglésite, PbSO_4 ($33 \mu\text{m}/\text{cm}$) (BSE - 20 KV
- 20 nA)

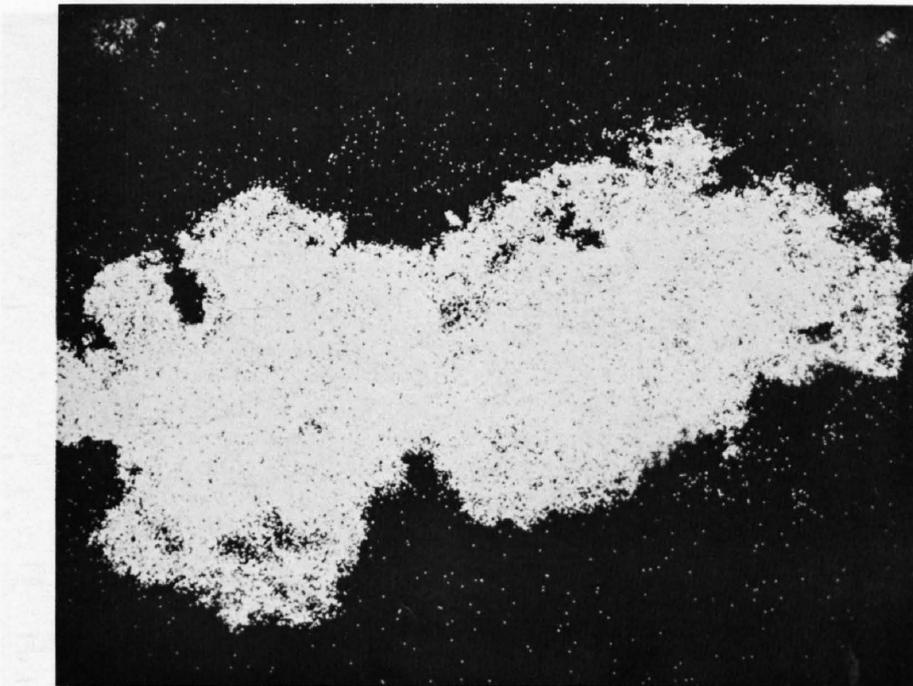


Photo 2:
répartition de l'argent de ce grain ($33 \mu\text{m}/\text{cm}$) (Ag - $L\alpha$ - 20 KV - 20 nA)

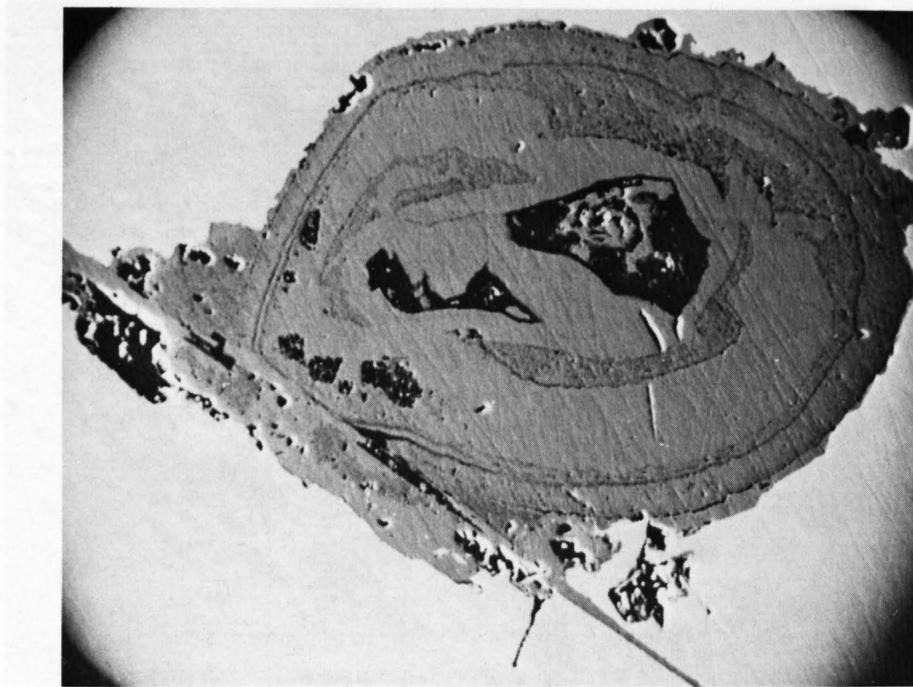


Photo 3:
grain d'anglésite pris dans la galène; en lisérés concentriques, la covelline (CuS); en noir, grains riches en Ag, Cu et S. (33 $\mu\text{m}/\text{cm}$) (BSE - 20 KV - 20 nA)

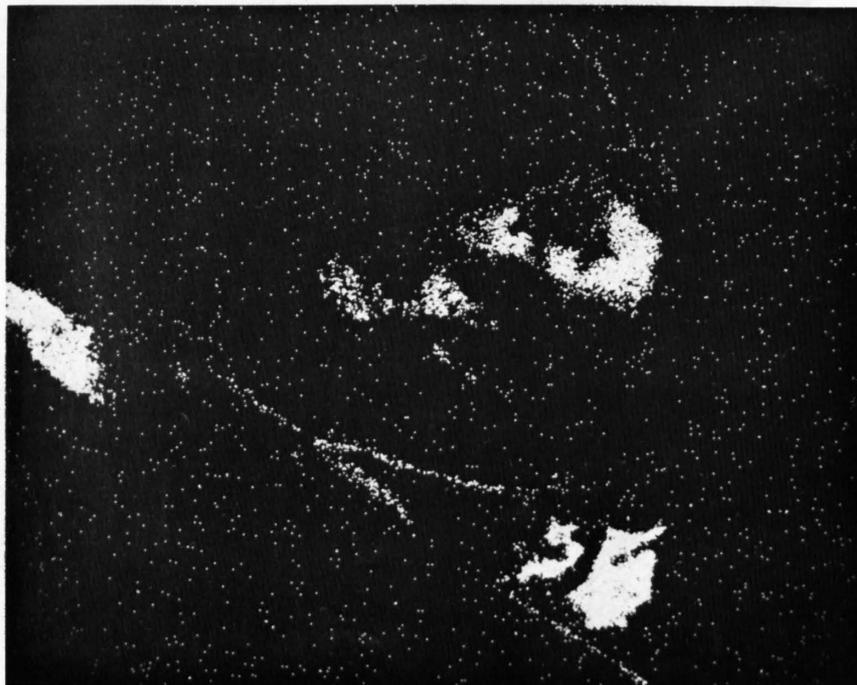


Photo 4:
répartition de l'argent dans ces grains (33 $\mu\text{m}/\text{cm}$) (Ag - $L\alpha$ - 20 KV - 20 nA)

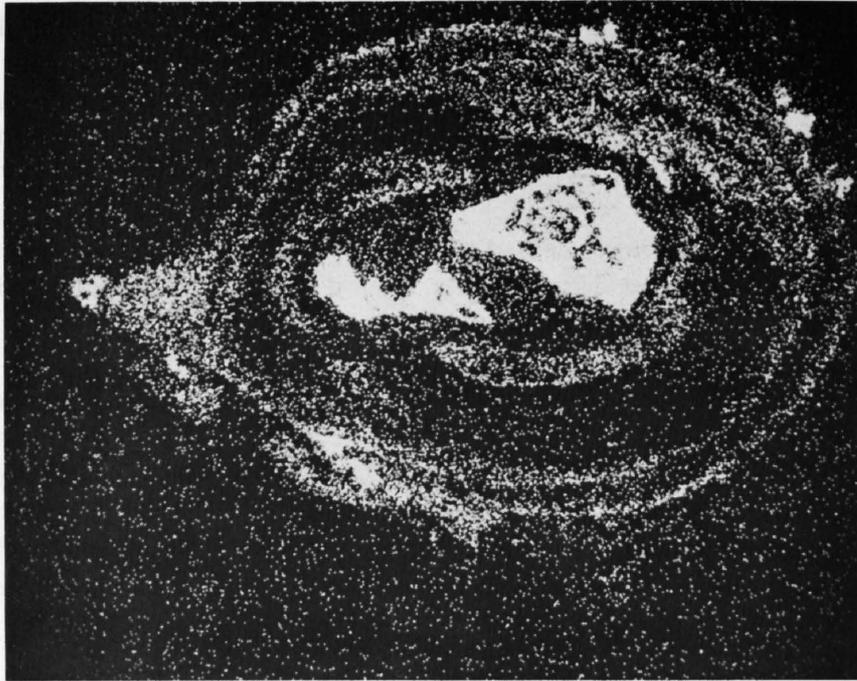


Photo 5:
répartition du cuivre ($33 \mu\text{m}/\text{cm}$) (Cu - $K\alpha$ - 20 KV - 20 nA)

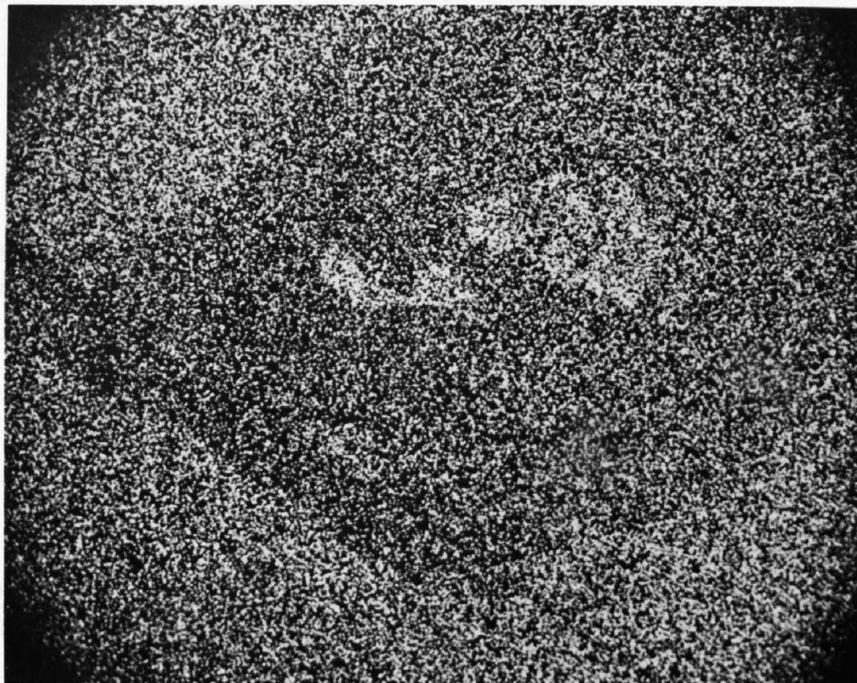


Photo 6:
répartition du soufre ($33 \mu\text{m}/\text{cm}$) (S - $K\alpha$ - 20 KV - 20 nA)

La concentration en Ag est très inégale et passe de 22 à 50 %. Peut-être s'agit-il d'un peu de stromeyérite, CuAgS, associée à des micrograins de covelline (CuS) et d'argentite? La photo 3 montre au centre du grain des plages noires qui pourraient être la stromeyérite; ces plages sont enrobées dans l'anglésite relativement claire parcourue par des lisérés concentriques de covelline. L'ensemble du grain est enchâssé dans la galène.

L'argent se concentre également dans d'autres grains sans cuivre ni plomb mais riches en soufre (photo 4); il se répartit aussi dans la petite veine d'anglésite recoupant la galène de l'échantillon TM1.

Deux échantillons, WM11 et TM1, pris l'un dans la tranchée de la rive droite du Wilerbach, l'autre sur la rive gauche du Tennera, sont particulièrement riches en Ag. Cet élément s'y concentre dans les zones où s'accumule l'anglésite. Cette répartition hétérogène laisse supposer que la teneur du filon en argent varie d'un endroit à l'autre et que, peut-être, certains affleurements sont particulièrement riches. Il serait à mon avis utile d'étudier le problème plus à fond et de tenir compte de la présence d'argent dans une éventuelle estimation économique du filon (ce que n'a pas fait le B.R.G.M.).

Outre l'argent, la géochimie a mis en évidence des anomalies très prononcées de *molybdène*, notamment dans le Wilerbach. Malheureusement, aucun des tests effectués à la microsonde n'a fait apparaître le molybdène. Il est possible que la molybdénite ait été arrachée au polissage ou, encore, qu'elle se concentre dans les roches encaissantes ou dans des filons parallèles, avec une paragenèse différente. Il serait intéressant de reprendre aussi cette étude. Signalons qu'un peu de molybdénite a été découverte dans des blocs d'éboulis de filons de quartz au N-E de Restialp (Th. Hügi, communic. orale).

3.8 PRESENCE DE GRAPHITE PRES DU FILON

Les très fortes anomalies de potentiel mesurées dans le Lötschental ne peuvent guère s'expliquer que par la présence de graphite dans les roches encaissantes du filon. La couleur gris-noir des surfaces d'échantillons confirme cette hypothèse.

L'analyse à la microsonde de deux échantillons, provenant de la zone minéralisée dans le Wilerbach et le Tennera, a permis de prouver la présence du graphite. Les photos 7 et 8 montrent, l'une l'aspect d'un filonnet de graphite, dont l'épaisseur n'excède guère 40 μm , l'autre la distribution du carbone dans cette veine.

La figure 3 permet de comparer les deux pics obtenus, l'un sur un échantillon-témoin de graphite pur, l'autre sur ce filonnet. La concentration en carbone dans celui-ci – en admettant que celle du graphite pur soit de 100 % – dépasse 90 % et montre bien qu'il ne peut s'agir de sulfures écrasés.

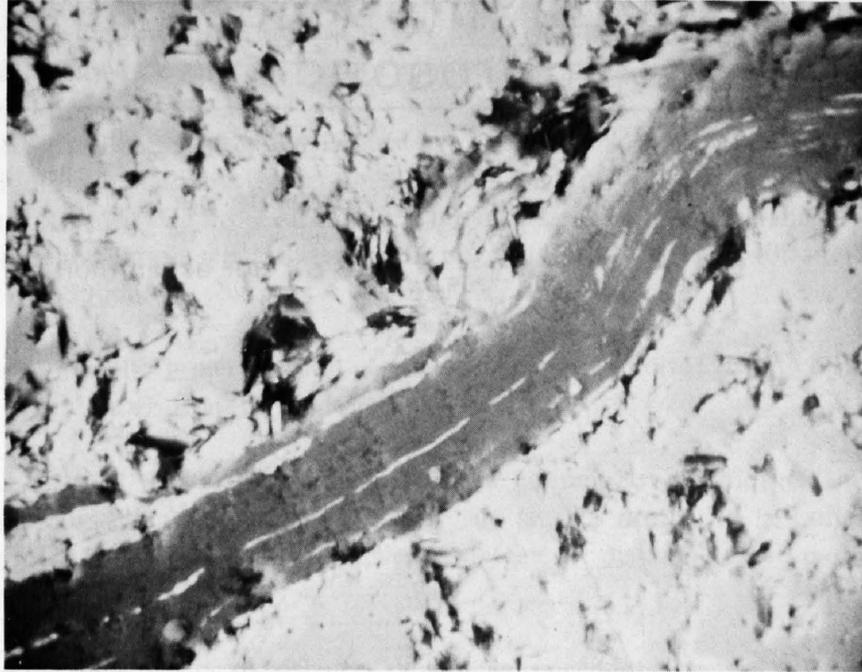


Photo 7:
filonnet de graphite (échantillon pris dans le Tennera) ($20\ \mu\text{m}/\text{cm}$) (BSE -
20 KV - 250 nA)

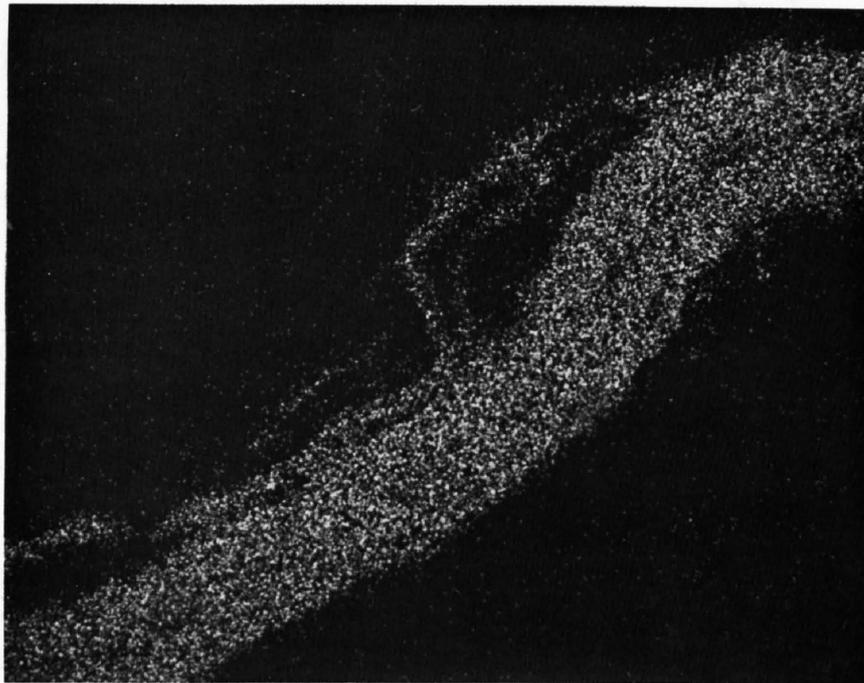


Photo 8:
répartition du carbone dans ce filonnet ($20\ \mu\text{m}/\text{cm}$) (RxC $K\alpha$ - 20 KV -
250 nA)

Contrôle de la présence de graphite Essai à la microsonde.

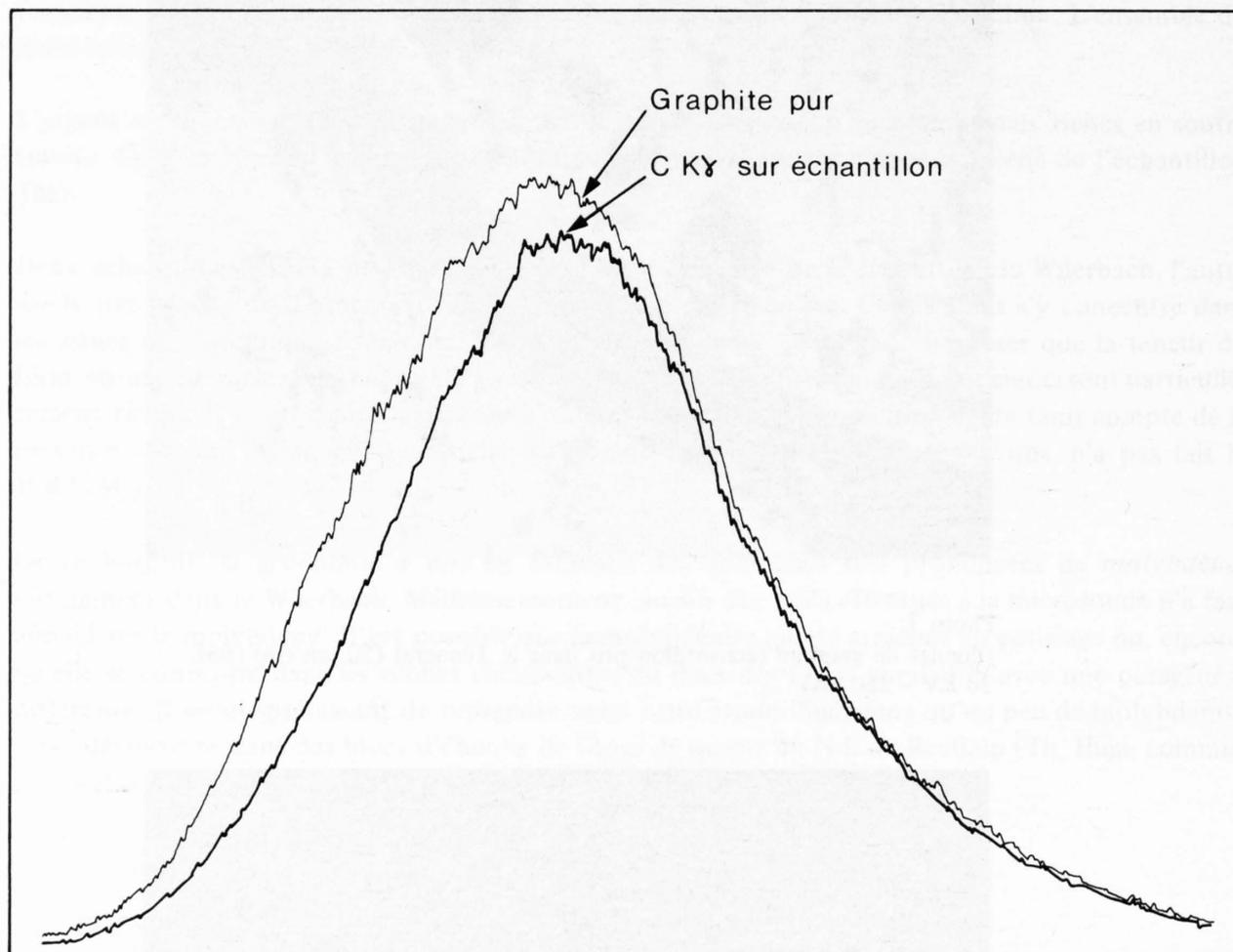


Figure 3

CHAPITRE 4 –

LES MESURES DE POLARISATION SPONTANÉE

4.1 INTRODUCTION

En effectuant, en août 1973, les deux profils de reconnaissance (en traitillé sur la figure 5), nous avons pour but de traverser le filon de galène et de voir s'il était la cause d'une chute de potentiel.

Le premier profil débute à 1'250 m d'altitude, 900 mètres environ à l'amont de la trace du filon (galerie Dahl), puis il suit la base des parois de Goppenstein sur la rive gauche de la Lonza et s'arrête 100 mètres après la traversée du Rotlauigraben et le passage de la galerie Dahl. A notre grande sur-

prise, une première forte anomalie négative se manifeste déjà bien à l'amont des minéralisations connues, dès la septième mesure en partant du NNW. Cette anomalie, située entièrement à l'amont de la zone minéralisée connue, est représentée sur l'ensemble du profil No. 1 (cf. figure 5).

Le second profil P.S., parallèle au premier, débute à 1'612 m sur le sentier très raide qui mène à l'ancienne exploitation du Rotenberg. Une anomalie semblable en forme et en amplitude à celle du profil no. 1 (cf. figure 5, profil P.S. no. 2 en traitillé) apparaît très vite à une distance de 400 mètres du filon exploité. La dénivellation séparant les profils no. 1 et 2 est de près de 400 mètres pour une distance horizontale de 350 mètres.

Etait-ce l'indice d'une nouvelle minéralisation parallèle au filon exploité? Etait-ce simplement la présence de niveaux graphiteux? Etait-ce les deux?

Il faut noter que H. LEDERMANN (1942) signale, dans une coupe pétrographique établie le long de la galerie d'amenée d'eau reliant Hohsteg à Mitthal, sur la rive droite de la Lonza, à environ 700 mètres de nos profils, la présence de trois niveaux de galène, distants de 640 mètres et de 190 mètres du filon le plus en aval.

Au début de l'été 1974, forts de nos expériences de l'année précédente, nous avons entrepris systématiquement l'étude des polarisations spontanées sur le versant sud du Lötschental. Le cheminement et l'espacement des profils ont été déterminés en fonction de la topographie; la nature minéralogique du filon ainsi que les premières observations géophysiques ont permis de fixer l'écartement des mesures et une base de référence a été établie dans le Wilerbach.

4.2 LA BASE GENERALE DE REFERENCE

La base générale de référence est un endroit choisi arbitrairement sur le terrain, par rapport auquel tous les potentiels seront directement mesurés ou rapportés après corrections. Elle doit se trouver en dehors de toute anomalie, dans une zone électriquement stable; par définition, la base équivaut au zéro de l'étude.

Lors d'un levé sur le terrain, on peut observer, de station en station, de faibles variations de potentiel. Ces variations aléatoires constituent le bruit de fond. Si la base, et par conséquent le zéro, ont été bien choisis, ces variations sont tantôt positives et tantôt négatives. Si d'aventure le levé révèle que l'emplacement de la base a été mal choisi, soit dans une zone positive ou une zone négative, il est toujours possible d'attribuer après coup à la base une valeur de référence non nulle arbitraire.

L'amplitude du bruit de fond varie d'un terrain à l'autre; il dépend, rappelons-le, du pendage des couches par rapport à la pente, de l'hétérogénéité des sols ou des roches, de leur différence d'humidité et de la présence ou non de végétation. Pour le Lötschental, le bruit de fond est élevé, généralement compris entre 0 et -200 mV.

Pour notre étude, la base générale est située dans le Wilerbach à 1'890 m, au-dessus du sentier. Les quelque 4'000 mesures effectuées dans la région lui sont toutes raccordées. Chaque électrode de référence intermédiaire mise en place lors d'une rupture de fil ou au départ d'un nouveau profil n'est en fait qu'une mesure rapportée à la base générale de référence grâce à la boîte de compensation. Si

l'on ne peut faire cette correction immédiatement, on l'effectuera après coup en tenant compte de la différence de potentiel établie à cet endroit. Dans ce cas, les stations mesurées par rapport à cette référence seront corrigées de la même valeur.

Le zéro initial ne peut être valable partout. Peu importe! Il est toujours possible de le corriger et de l'adapter à chaque profil P.S. Si, à l'amont de la vallée, il paraît bien choisi, dans la région de Goppenstein, il semble trop négatif de 150 à 200 mV: la différence d'altitude de 800 mètres, le changement d'orientation du versant jouent notamment un rôle.

Le choix d'une base générale est indispensable à l'élaboration d'une carte des courbes équipotentiellles.

4.3 REPARTITION DES PROFILS P.S.

La figure 4 montre la répartition des profils P.S. sur la surface prospectée entre Goppenstein et le Langgletscher. L'emplacement de la base générale du Wilerbach (potentiel zéro) y est indiqué. 43 profils P.S., dont 15 courts ne traversent que le filon connu, se répartissent sur le versant orienté vers le N-E. Le pointillé (profils no. 20 à 28) correspond à des tronçons sans mesure: nous n'y avons déroulé le fil que pour garder le contact électrique avec la base et disposer ainsi d'une référence au départ du profil suivant.

Puisque le filon stratiforme suit la direction des couches, elle-même parallèle à la vallée entre Schönbühl et l'est de Faflerstafel, tous les profils sont dans la ligne de plus grande pente. Chacun des longs profils correspond à une dénivellation de 300 à 800 mètres, pour une distance de 500 à 1'500 mètres, en moyenne, et débute à une altitude d'environ 1'800 à 2'000 m. Cependant, la répartition de ces profils n'est pas régulière: entre Goppenstein et Ried, ils sont plus rapprochés qu'ailleurs, suivant la base ou le sommet des crêtes ou longeant le milieu des vallons. A la hauteur de Ried, la pente devient plus raide, les sentiers se font plus rares. Certains couloirs sont dangereux; chaque vallon aboutit à un glacier sur lequel il est impossible de faire des mesures à cause de la trop haute résistivité électrique de la glace. Le pied même des glaciers est dangereux à cause des chutes de séracs et de pierres. De ce fait, l'anomalie reste souvent inaccessible dans le creux des vallons; c'est pourquoi, dans de telles zones, les profils restent espacés, limités qu'ils sont aux crêtes.

4.4 ECARTEMENT DES MESURES

L'épaisseur de la minéralisation est variable. Si le filon exploité atteint par endroits plusieurs mètres, dans le Wilerbach et le Tennera, la zone minéralisée se limite à des filonnets de galène de 2 à 3 cm chacun. Il faut s'attendre par conséquent à une anomalie très étroite, décelable par des mesures très proches.

Les deux profils de 1974 (cf. figure 5) se superposent à ceux de 1973. La différence entre les écartements de mesures (30, 10, 5 mètres) révèle qu'avec un écart de 30 mètres on peut sauter une anomalie si, par malchance, les deux électrodes se trouvent sur la même équipotentielle, de part et d'autre de ladite anomalie.

Aussi, après ces premiers tests, avons-nous opté pour une distance de 15 mètres entre les mesures, avec un resserrement tous les 5 mètres ou tous les mètres dès que le gradient devient très élevé et que l'anomalie dépasse -300 mV. Le profil no. 2 montre qu'un pic de -600 mV, très régulier, n'est pas décelable avec un écart de 30 mètres, mais l'est avec un écart de 5 mètres.

Par contre, lors de traversées horizontales, parallèles aux filons, où l'on suit, théoriquement, l'équipotentielle, on peut espacer les mesures à 30 mètres; de même au travers des éboulis ou des dépôts morainiques épais.

Ainsi, l'espacement des mesures varie sur un même profil. Dans la pente, il n'excède en principe pas 15 mètres. Les profils, entre eux, sont distants de plusieurs centaines de mètres.

4.5 REPORT DES VALEURS

Puisqu'il n'existe, à ce jour, pas de levé topographique du Lötschental au 1:25'000, nous n'avions à disposition qu'une carte au 1:10'000, en grande partie muette, fournie par le Service technique cantonal du Registre Foncier à Sion. Sans points cotés, nous devons nous fier à l'altitude indiquée par l'altimètre et étions dans l'impossibilité de la corriger à cause du manque de repères topographiques. Les variations de pression atmosphérique peuvent provoquer, certains jours, des erreurs allant de plusieurs mètres à plusieurs dizaines de mètres.

Le report des mesures s'est fait sur un agrandissement du 1:10'000 au 1:2'500; l'altitude était prise tous les 30 mètres. Le 1:2'500 est l'échelle minimale pour le report des valeurs mesurées tous les 15, 10 ou 5 mètres. Comme ces valeurs sont fonction de l'emplacement de la base générale et que les potentiels dépendent de facteurs encore mal connus, les erreurs d'altitude n'ont que peu d'importance pour une reconnaissance préliminaire qui doit souvent procéder par interpolations ou extrapolations et admettre par conséquent une certaine imprécision. L'interpolation des équipotentielles entre deux profils distants de plus de 500 mètres en est un exemple. En revanche, la localisation des échantillons de sols prélevés pour l'analyse géochimique devra être beaucoup plus précise.

4.6 REPRESENTATION DES RESULTATS

La représentation des mesures se fait sous deux formes: *la carte des équipotentielles* et le *profil P.S.*

La carte des équipotentielles présentée ici (planche 1) est à l'échelle du 1:20'000. Elle a été tirée du fonds topographique muet et n'indique que le réseau hydrographique et les principaux villages. L'équidistance des courbes de niveau y est de 100 mètres. A cette échelle, il est impossible de reporter les points de mesures, encore moins leurs valeurs. Seules sont donc dessinées les courbes de même potentiel, avec un écart de 100 mV.

Toutes les valeurs comprises entre 0 et -200 mV sont laissées en blanc: c'est le bruit de fond. Trois figurés hachurés de plus en plus sombres soulignent les plages négatives -200 à -400 mV, -400 à -600 mV et -600 à $-1'000$ mV. Les zones positives apparaissent en pointillé.

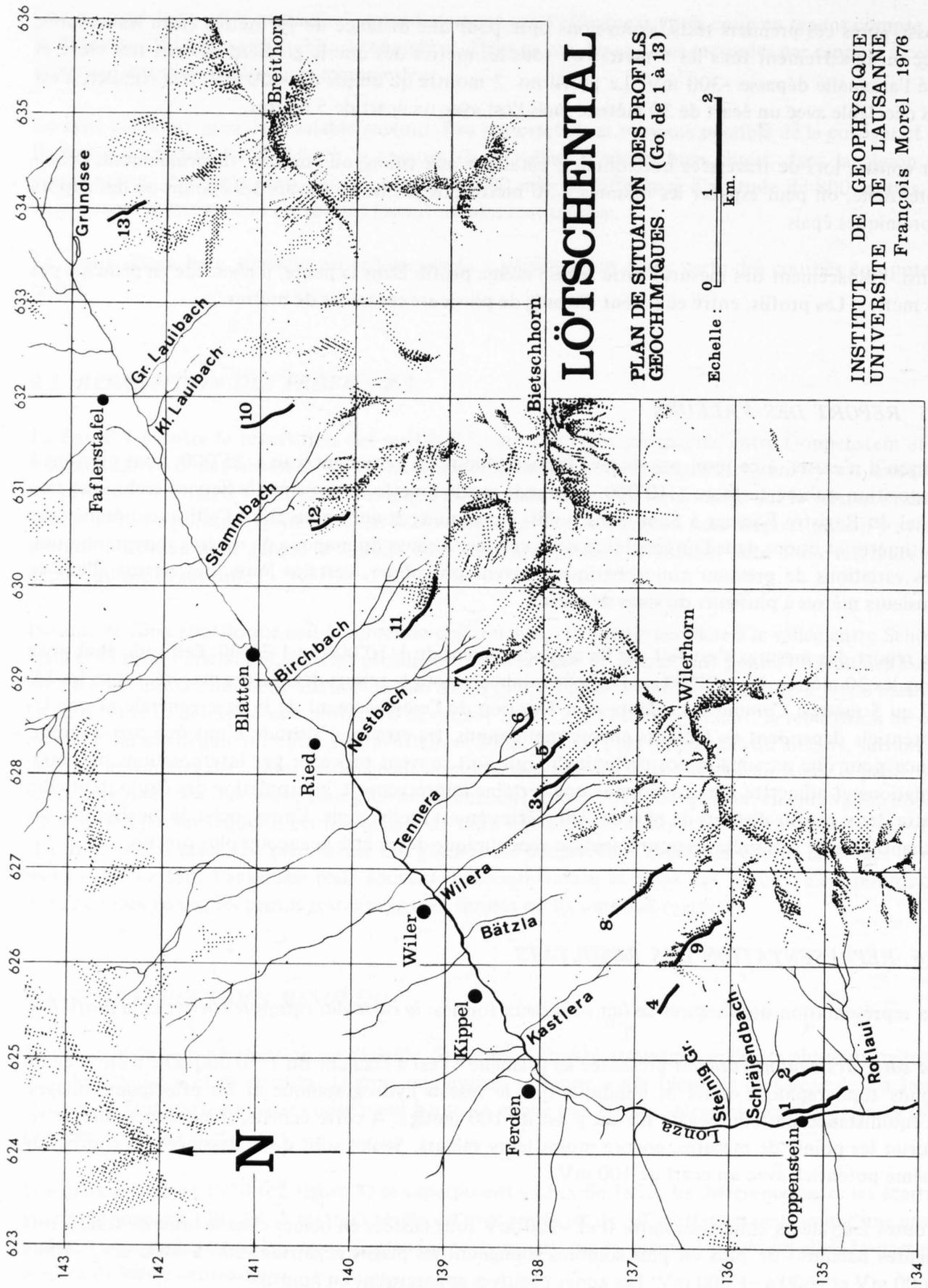


Figure 4

L'anomalie s'étend sans interruption de Goppenstein à l'est du Grundsee. Sa direction SW-NE est parallèle aux couches. Sa largeur passe de 100 mètres à l'amont à près d'un kilomètre au nord de Schönbühl. Par endroits, l'anomalie se subdivise et montre plusieurs minima parallèles avec souvent des remontées de potentiel proches du zéro. Ces minima atteignent le plus souvent -700 à -900 mV, sauf sur les traversées du filon de Schönbühl, où l'anomalie est plus faible.

Enfin, deux surfaces positives ressortent, l'une au sud-est de Blatten, l'autre au sud du Grundsee. Elles correspondent certainement à une P.S. d'électrofiltration sur de gros cônes de déjection ou des dépôts morainiques. Ces surfaces positives ne doivent pas être interprétées comme le pôle positif d'une anomalie dissymétrique que donnerait une lentille de minerai inclinée, car c'est ici l'électrofiltration qui est cause de la tendance négative observée vers les sommets.

La carte équipotentielle donne une vue de l'ensemble d'un champ d'anomalie: elle esquisse son étendue, sa direction, ses rétrécissements et ses élargissements.

Sur notre carte, la zone anormale montre une symétrie de part et d'autre des minima: cela paraît logique dans l'hypothèse où le filon a le même plongement que les couches. On peut admettre qu'il est perpendiculaire à la topographie; son effet géophysique est semblable à celui qu'aurait une plaque verticale sous une surface plane.

Pour plus de détails, en particulier pour tirer une interprétation quantitative d'une anomalie, on a recours au profil P.S.

Le profil P.S. est une coupe à travers l'anomalie et ne montre qu'un aspect local de celle-ci. On porte en abscisse la distance et en ordonnée le potentiel; l'échelle dépend de l'amplitude de l'anomalie et de la distance entre les mesures.

Le profil P.S. met en évidence, mieux que la carte, la largeur de l'anomalie, son amplitude et sa symétrie. Il peut faire ressortir une tendance négative ou positive du „zéro”, lequel varie souvent d'un profil à l'autre et ne suit pas nécessairement une ligne droite; il souligne le bruit de fond.

Avant une interprétation quantitative, il faut simplifier la courbe („lissage”) ou calculer une moyenne mobile pour éliminer les phénomènes parasites et s'approcher de la courbe théorique et idéale à laquelle on va assimiler le profil. Ce „lissage” élimine en principe toutes les variations de potentiel dues aux phénomènes P.S. autres que celui qui est causé par le minerai.

4.7 INTERPRÉTATION D'UN PROFIL

Il existe plusieurs modes d'interprétations quantitatives d'un profil P.S. Par simplification, les auteurs assimilent tout corps minéralisé à un dipôle électrique de forme simple (sphère, barre, feuillet) dont le pôle négatif est le sommet du corps (zone d'oxydation).

POLDINI (1938) présente plusieurs cas théoriques: un filon *vertical* donne une anomalie négative symétrique autour du minimum. L'abscisse du point d'inflexion de la courbe est fonction de la profondeur h' du pôle positif (zone de réduction). Il est donc possible de calculer la profondeur h d'enfouissement du pôle négatif en fonction de l'abscisse x du point d'inflexion et de la profondeur h' . Si h' est infini, $x = h$; si $h' = 2h$, $x = 0,768 h$.

Pour un filon *incliné*, la courbe devient asymétrique. La forme de l'anomalie est la somme des influences des deux pôles. Poldini remarque que:

1^o) „La chute de potentiel est plus rapide en aval pendage qu'en amont pendage. Un centre positif moins marqué que le centre négatif apparaît.”

2^o) „Le centre positif, en surface, n'est pas à l'aplomb de C⁺.”

Double ligne de pôles infinie verticale:

Cette structure est assimilable à une plaque très mince, de longueur infinie, de largeur 2ℓ et d'épaisseur négligeable.

BANERJEE (1970) propose deux formules qui permettent de calculer les distances h (profondeur de la surface du terrain au centre de la plaque) et ℓ (demi-largeur de cette double ligne de pôles):

$$h = \frac{b^2 - a^2}{2a} \quad \text{et} \quad \ell = \frac{\sqrt{(b^2 - 3a^2)(b^2 + a^2)}}{2a}$$

où a est l'abscisse de la moitié de la valeur du potentiel minimum et b l'abscisse du quart de cette valeur.

La profondeur du pôle négatif vaut donc $h - \ell$. On remarque que si b est égal ou inférieur à $a\sqrt{3}$, le radical devient nul ou négatif; le corps n'est pas assimilable à une double ligne de pôles infinie verticale. Or, l'interprétation exige un „lissage” préalable de la courbe de terrain, sujet à une certaine subjectivité de la part de l'interprète. Si le radical est très faiblement négatif, on pourra tenter d'autres „lissages”: il ne faut donc pas attribuer trop de précision aux valeurs de h et ℓ obtenues et rester conscient de la valeur approximative du résultat.

Double ligne de pôles inclinée infinie:

P. GEX (thèse, 1977) a établi une série d'abaques calculés, cette fois, pour une double ligne de pôles inclinée infinie (20, 40, 60 degrés). Chaque série de courbes correspond à une inclinaison donnée α (angle par rapport à la verticale) et une demi-largeur ℓ du dipôle; h est différent pour chaque courbe.

Pour interpréter une courbe de terrain, il faut:

1^o) „lisser” la courbe;

2^o) la ramener, sur un papier millimétré, aux échelles standards de l'abaque (en y , V/V_{\min} ; en x , la distance);

3^o) superposer les courbes;

4^o) déduire, s'il est possible, h , α et ℓ , puis calculer la profondeur x du pôle négatif: $x = h - \ell \cos \alpha$.

On observe, sur ces abaques, que le zéro de l'abscisse correspond à la verticale du pôle négatif mais qu'il ne coïncide pas avec le minimum de l'anomalie. Plus la structure est inclinée, plus l'anomalie

est asymétrique; si ℓ augmente, l'anomalie s'élargit. Enfin, il apparaît un pôle positif à l'aval pendage. Pour une largeur ℓ et un angle α constants, l'anomalie s'étale avec l'augmentation de la profondeur h .

Dipôle vertical:

L'interprétation suit la même démarche que pour la double ligne de pôles inclinée infinie.

Les demi-abagues proposés par P. Gex sont symétriques par rapport au minimum de l'anomalie: l'abscisse 0 coïncide avec la verticale de ce minimum (pôle négatif). Là aussi, pour une demi-largeur ℓ donnée, l'anomalie s'étale avec l'augmentation de h . La profondeur du pôle négatif vaut $h - \ell$ ($\alpha = 0$).

Remarques:

Il est illusoire de vouloir atteindre une trop grande précision dans l'interprétation d'une anomalie P.S. En réalité, cette interprétation ne se justifie que comme guide pour la prospection détaillée d'un gisement aveugle, dont la présence aurait été, par exemple, signalée par des anomalies géophysiques ou géochimiques. Dans ce cas, l'épaisseur du terrain de recouvrement ainsi que le plongement et la direction du corps doivent être connus pour l'implantation de forages ou le creusement de tranchées.

Notons que l'interprétation utilise des profils perpendiculaires à la structure, obtenus le plus souvent à partir de la carte équipotentielle. Il faut aussi noter que la grandeur h ne correspond pas à la profondeur de la moitié du corps minéralisé, mais à celle du centre du dipôle électrique.

Les formules et les abagues proposés ne tiennent pas compte de l'épaisseur du corps; si le pôle négatif n'est pas profond, l'épaisseur de la minéralisation devrait, logiquement, étaler l'anomalie. C'est peut-être là une source d'erreur dans l'évaluation de h .

4.8 EXEMPLES DE PROFILS P.S.

Le premier exemple (cf. figure 5) représente deux profils P.S. effectués, le premier, à la base des parois de Goppenstein et le second, qui lui est parallèle, à 400 mètres de dénivellation plus haut. Cette figure est intéressante, car elle montre que:

- Le phénomène P.S. est stable dans le temps: l'amplitude des anomalies reste la même à une année d'intervalle et leur forme est conservée.
- Le resserrement des mesures peut déceler une anomalie très étroite.
- Le „zéro” du Wilerbach est trop négatif (environ 150 mV) par rapport à un „zéro” local. Celui-ci varie d'un profil à l'autre.
- Chaque zone anormale est la somme de plusieurs anomalies qui interfèrent les unes sur les autres; une interprétation quantitative serait ici sujette à trop d'interpolations, et différents „lissages” seraient possibles. Seul le pic de -600 mV du profil no. 2 pourrait être interprété.

Profils P.S. à travers le filon de galène, à Schönbühl (figure 6):

Six courts profils traversent perpendiculairement le filon de galène. Les anomalies atteignent -150 à -250 mV d'amplitude; elles semblent correspondre au filon, même si celui-ci ne concorde pas toujours avec le potentiel le plus négatif. La distance entre les mesures est de 5 mètres. Le pendage des couches est ici de 73 degrés vers 145 degrés; on peut le considérer comme perpendiculaire à la topographie. Une observation frappe: la largeur de l'anomalie varie de 15 à 250 mètres suivant le profil. Y a-t-il, en dehors de la galène massive, des sulfures disséminés? Le graphite joue-t-il un rôle? Il est vraisemblable que, lorsqu'elle est large, l'anomalie trouve sa cause dans plusieurs phénomènes.

Profils P.S. à travers le filon de galène du Wilerbach (figure 7):

Les quatre profils traversent le ou les filonnets de galène mis à jour par des tranchées et des grattages à 3,5 km à l'amont de Schönbühl. Les anomalies sont ici plus vives qu'à Schönbühl: elles atteignent près de 600 mV en valeur absolue et apparaissent sur une distance de 80 à 100 mètres. La symétrie des pics et la remontée au même potentiel prouvent la perpendicularité du filon sur la surface topographique. Le graphite est présent dans les roches encaissantes et accentue certainement l'anomalie.

Profil P.S. no. 19 (figure 8):

Ce fragment de profil se situe sur la rive gauche du Nestalp (cf. carte topographique au 1:50'000, Jungfrau no. 264) entre 2'100 et 2'360 m. L'écart des mesures passe de 15 mètres à 5 mètres et 1 mètre pour les forts gradients.

Une première zone anormale, constituée de trois pics importants de -600 à -700 mV, se marque entre 2'170 et 2'240 m, sur une distance de près de 200 mètres. Le potentiel remonte à zéro puis retombe très rapidement à -990 mV; cette anomalie est un exemple de régularité et de symétrie; le gradient atteint 565 mV en 5 mètres; on trouve même jusqu'à 290 mV sur 1 mètre.

A première vue, une telle intensité est typique d'un niveau graphiteux mince, et l'on n'admet guère qu'un sulfure, surtout dans la galène, puisse donner une telle réaction. Or, un profil géochimique a été établi sur ce profil P.S. et les analyses quantitatives de sols font ressortir vers 2'330 m une forte anomalie en Pb et en Zn (860 ppm) correspondant exactement à l'anomalie géophysique de -990 mV.

Nous reviendrons plus loin en détail sur les résultats des anomalies géochimiques.

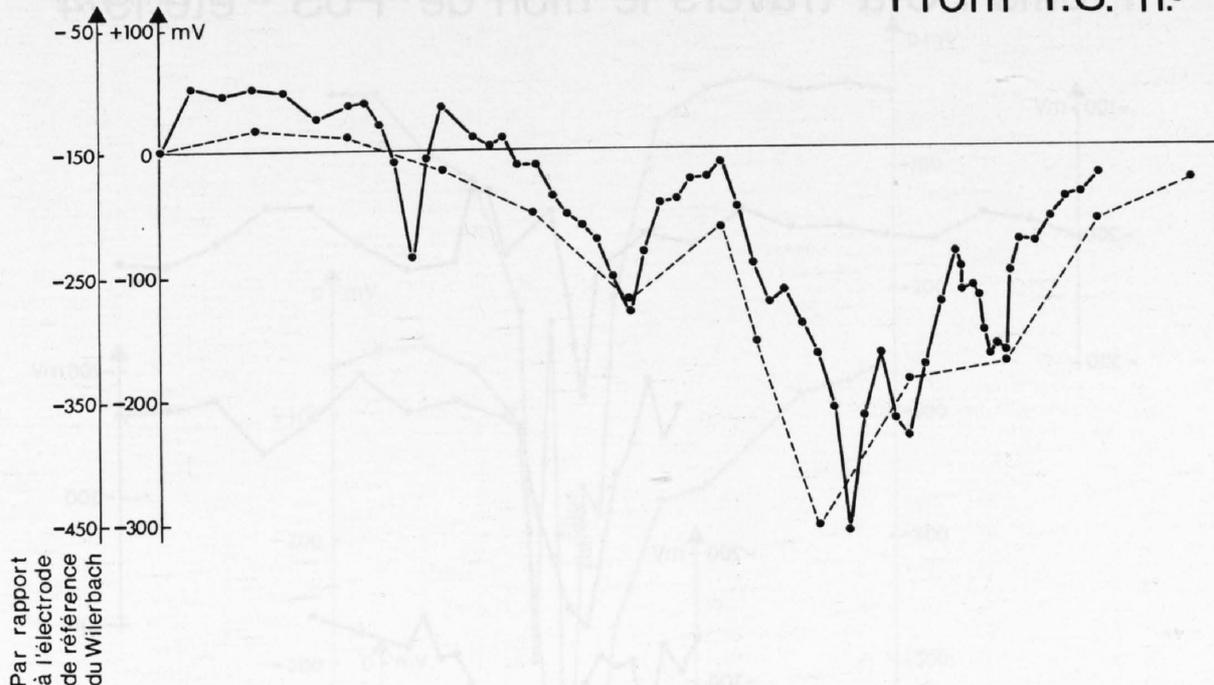
Profils P.S. no. 24, 25 et 26 (figure 9, 10 et 11):

Ces trois profils se situent au sud-est de Faflerstafel. Le numéro 24 longe une crête rocheuse où se décèlent, entre 2'100 et 2'300 m, deux anomalies bien distinctes, de forme et d'amplitude semblables (environ -800 mV). Le potentiel remonte au zéro du profil; 200 mètres séparent les minima.

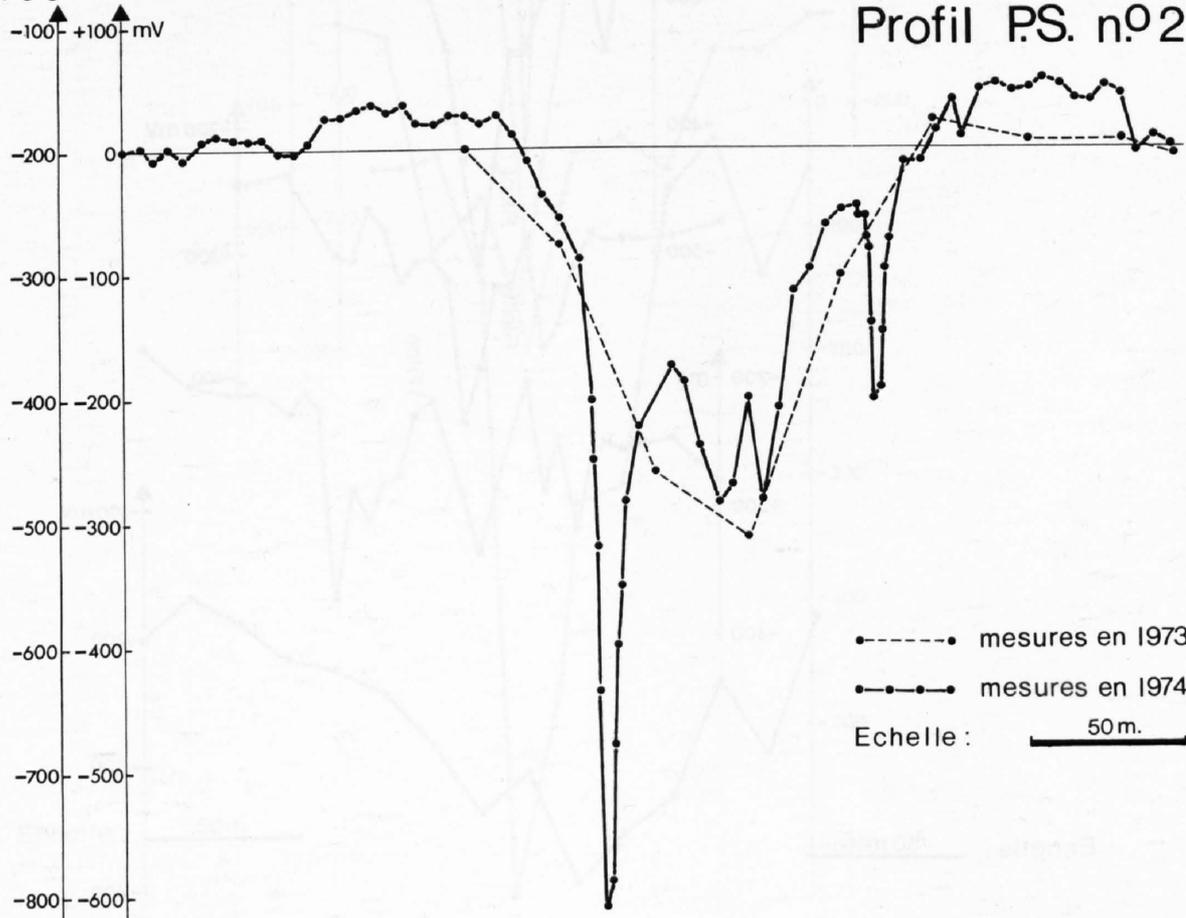
Le profil no. 25, lui, se trouve 1 km plus en amont. Une grosse anomalie dépassant -800 mV apparaît entre 2'200 et 2'300 m. En l'étudiant de plus près, on distingue deux minima distants de 100 mètres environ, trop proches probablement pour permettre une remontée du potentiel au zéro. On peut supposer, ici, qu'il y a deux niveaux conducteurs, encore bien distincts sur le profil no. 24, qui se rapprochent vers l'amont de la vallée et dont on remarque encore à peine l'effet sur le profil no. 25. Cette hypothèse se confirme sur la carte équipotentielle, puisque la zone anormale se rétrécit à tel point qu'elle est dix fois moins large au sud de Faflerstafel qu'à Schönbühl.

Lötschental

Profil P.S. n° 1



Profil P.S. n° 2



N NW

Figure 5

SSE

Schönbühl

Profils PS à travers le filon de PbS été 1974

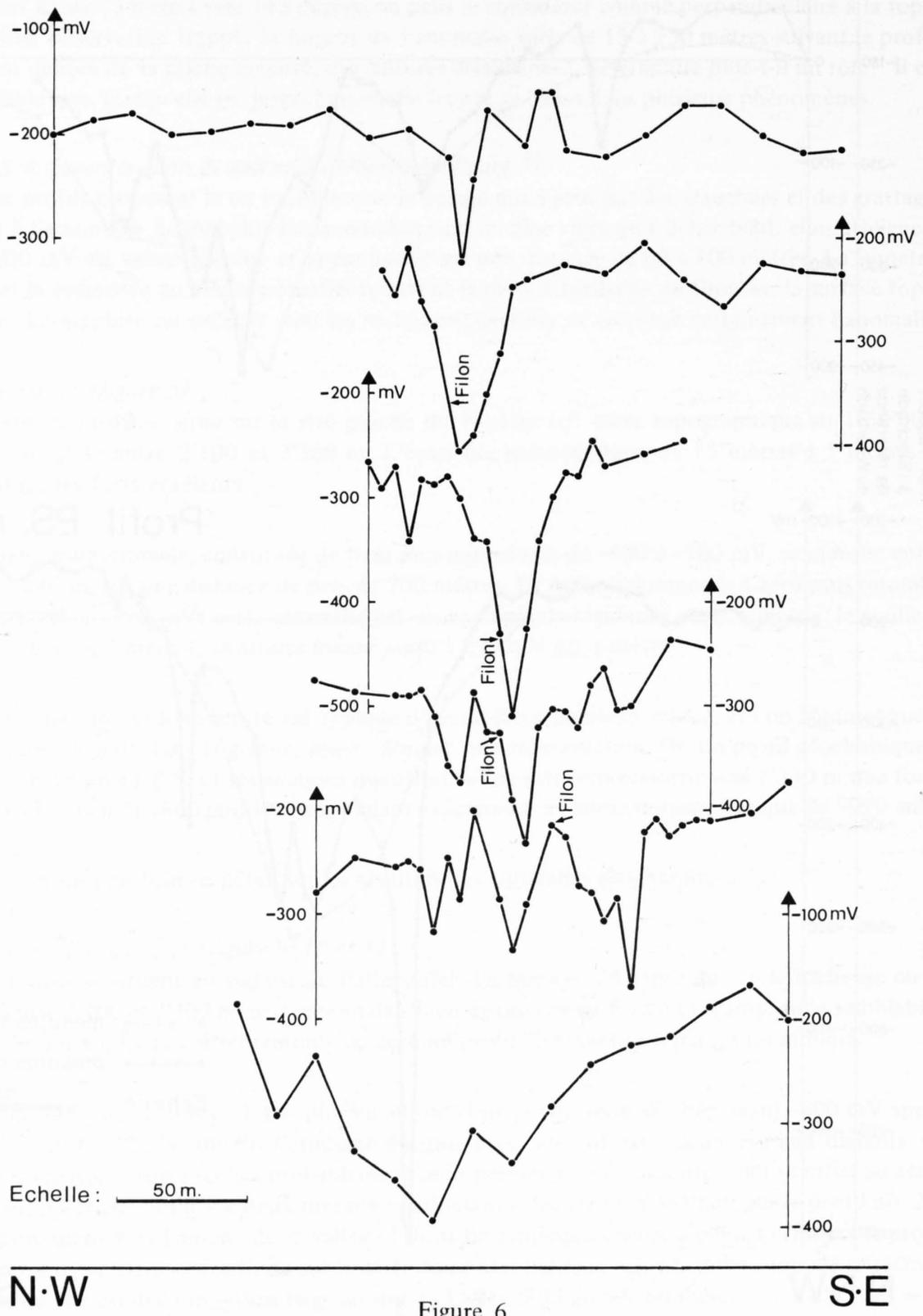
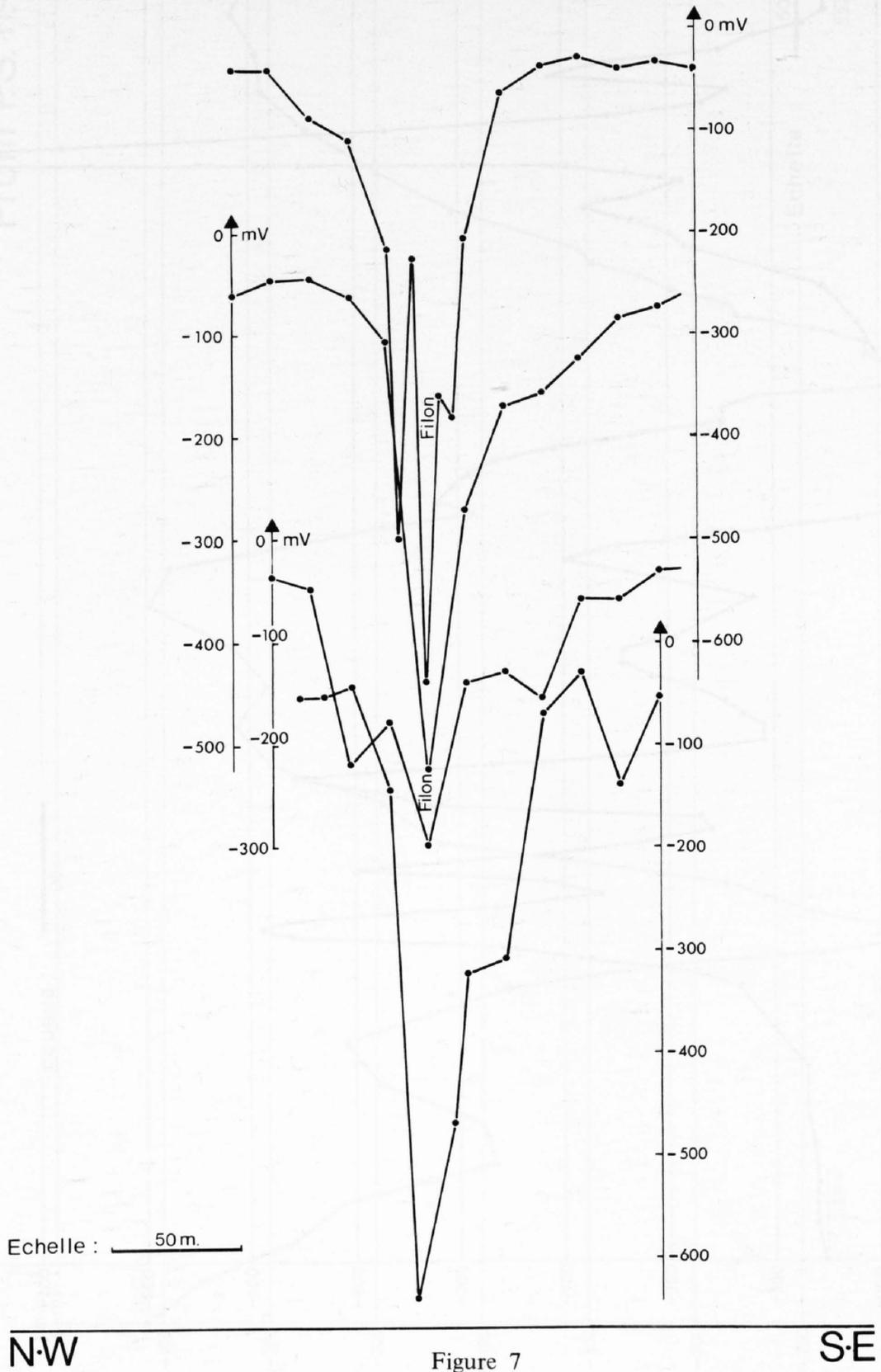


Figure 6

Wilerbach

Profils PS à travers le filon de PbS été 1974



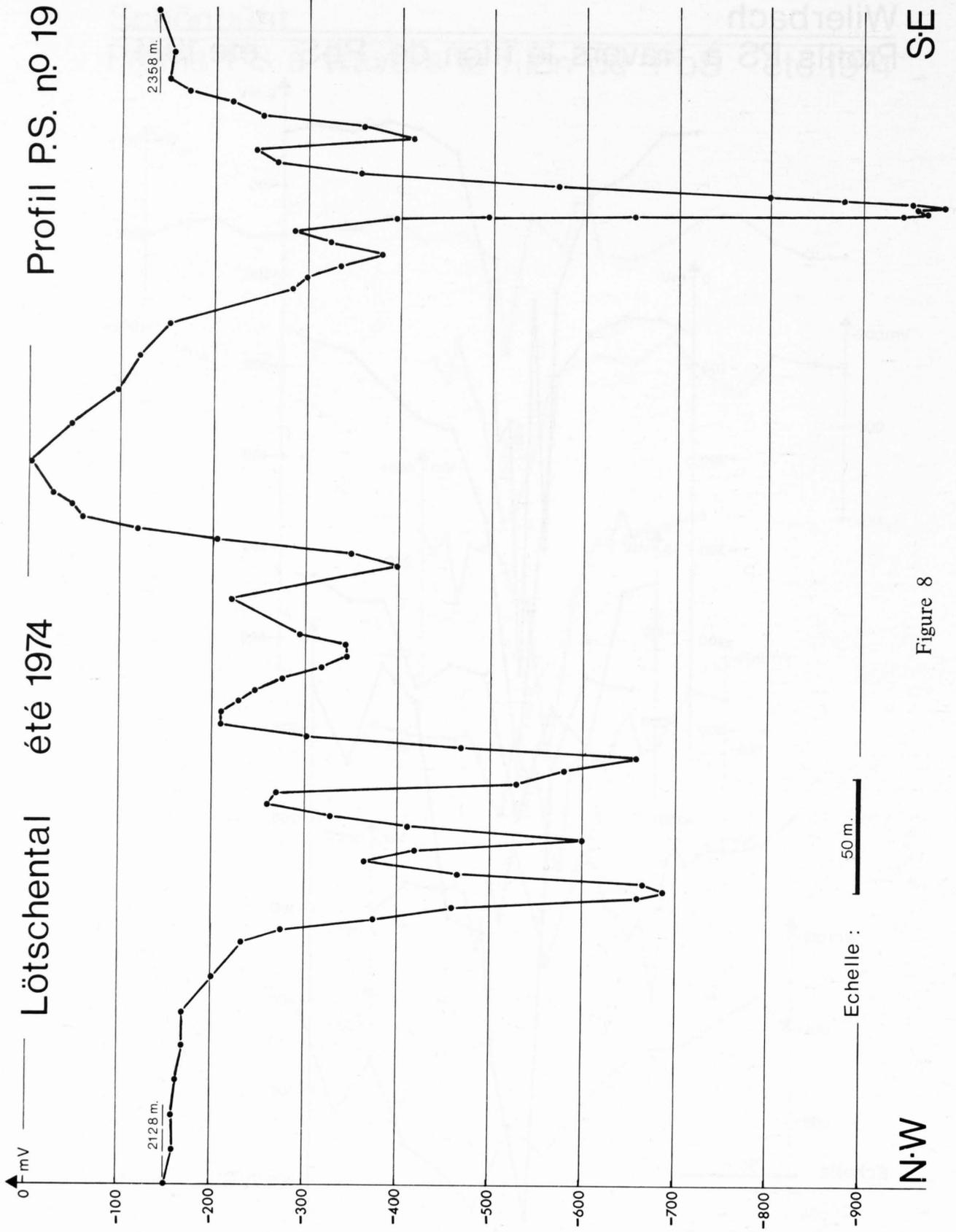


Figure 8

Lötschental été 1975

Profil P.S. n.º 24

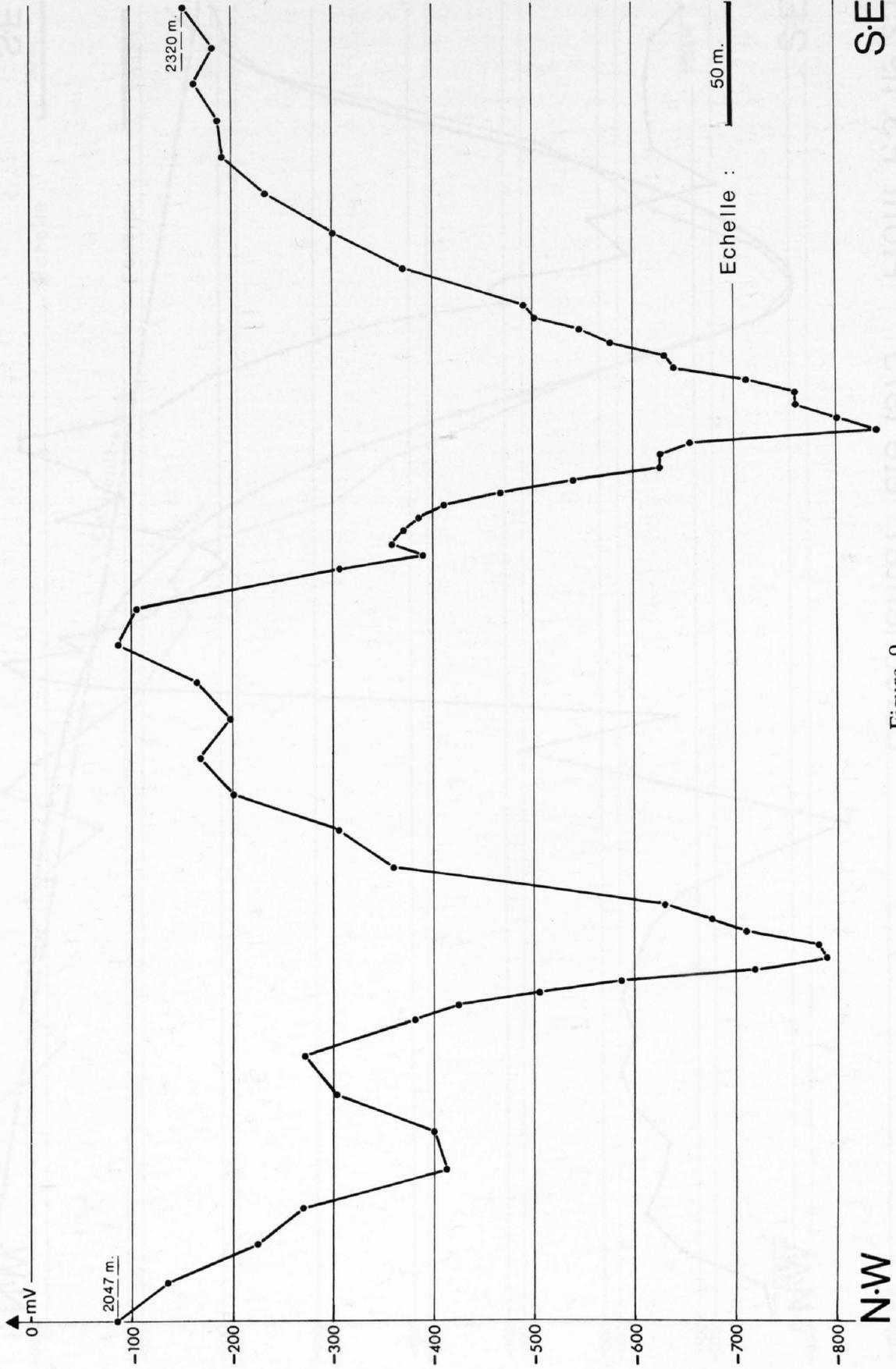


Figure 9

Lötschental été 1975 Profil P.S. n° 25

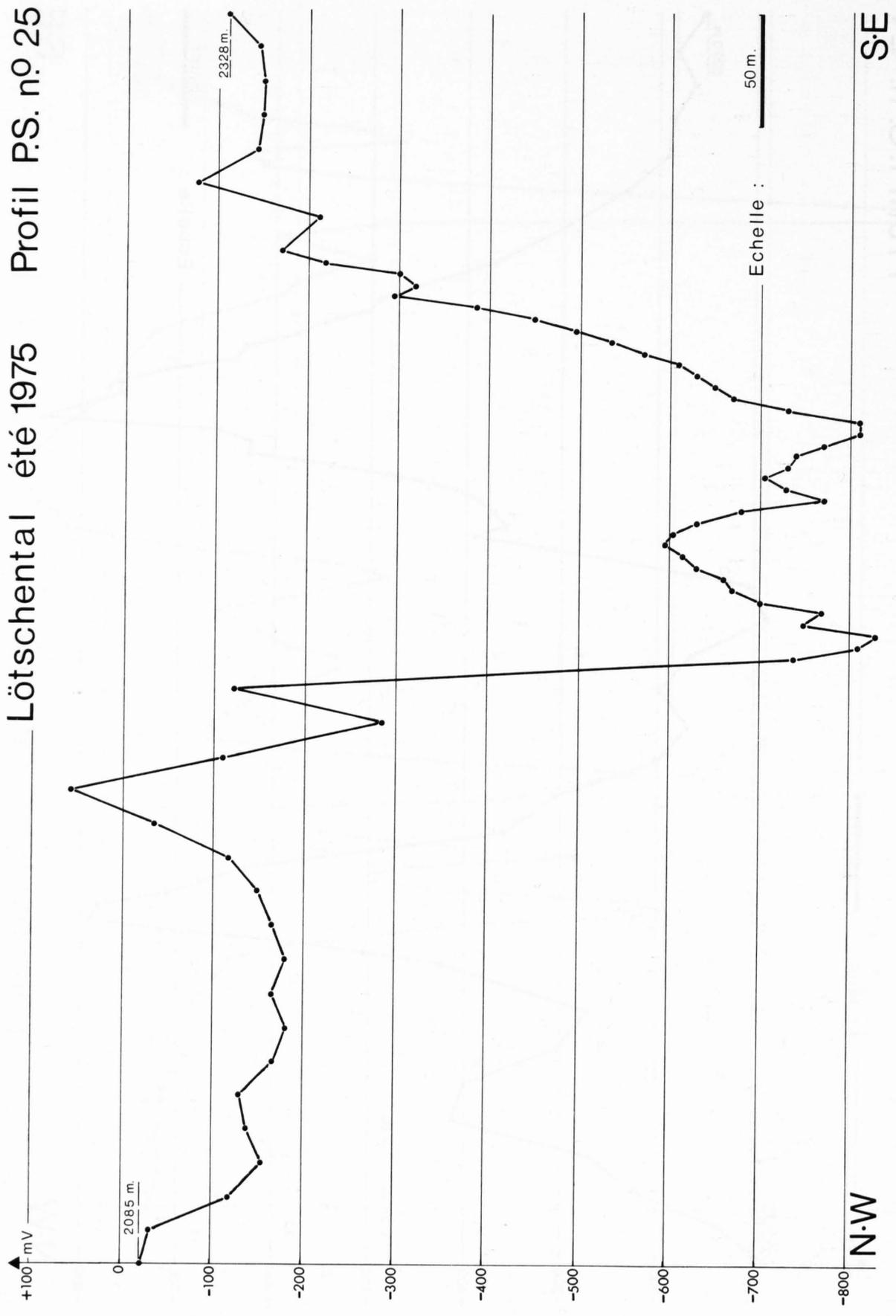


Figure 10

Profil P.S. n.º 26

Lötschental été 1974

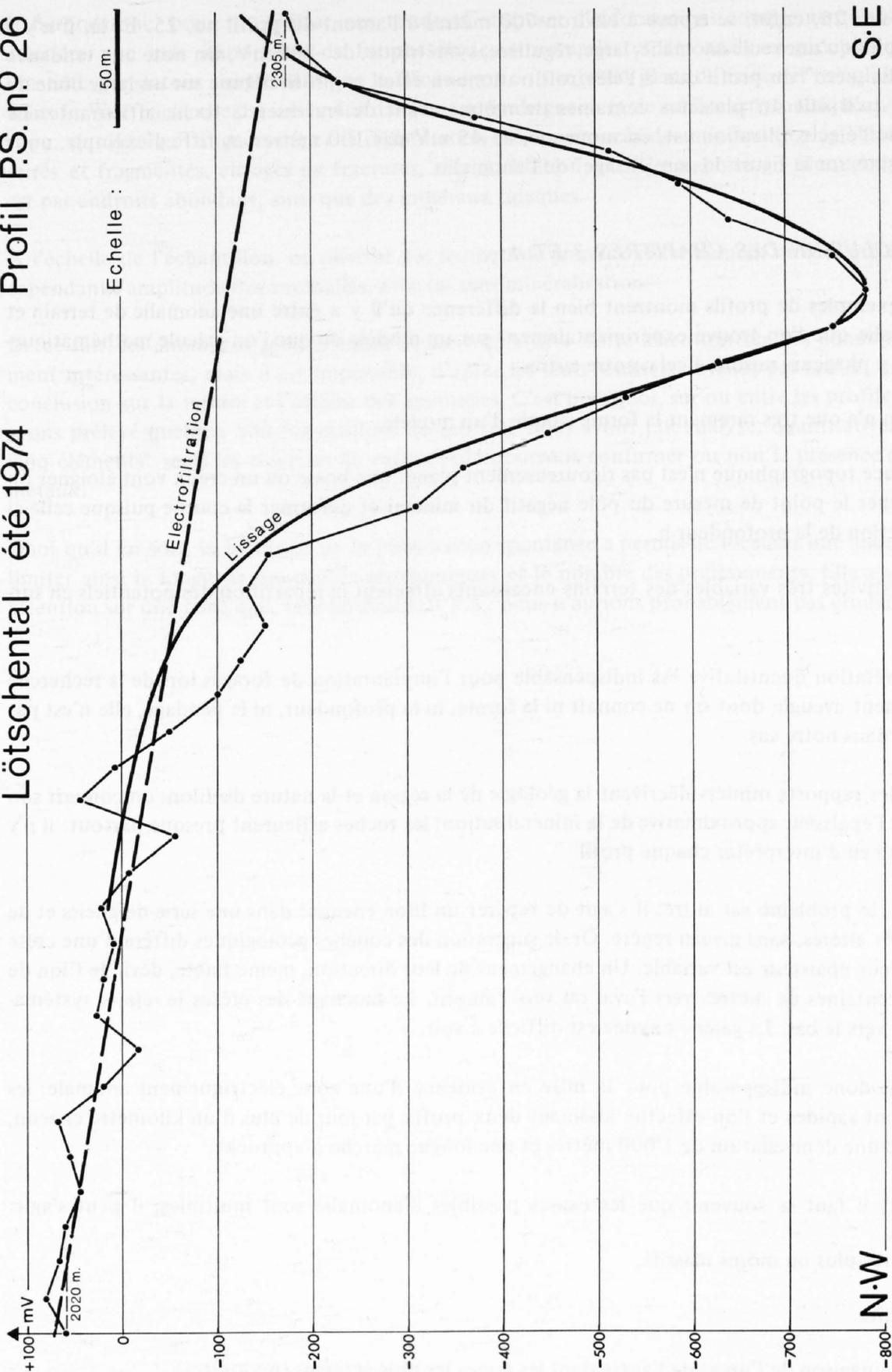


Figure 11

Le profil no. 26, enfin, se trouve à environ 700 mètres à l'amont du profil no. 25. Et là, il n'y a vraiment plus qu'une seule anomalie, large, régulière, symétrique, de -800 mV. On note une tendance négative du „zéro” du profil due à l'électrofiltration; en effet, ce profil débute sur un large cône de déjection qu'il suit sur plusieurs centaines de mètres avant de traverser la roche affleurante. Le gradient de l'électrofiltration est, en moyenne, de 45 mV par 100 mètres. A titre d'exemple, nous avons dessiné, sur la figure 11, un „lissage” de l'anomalie.

4.9 CONCLUSION DES CHAPITRES 3 ET 4

Tous les exemples de profils montrent bien la différence qu'il y a entre une anomalie de terrain et une anomalie que l'on trouve expérimentalement sur un modèle ou que l'on calcule mathématiquement. Il y a plusieurs raisons à cela, entre autres:

- Un filon n'a que très rarement la forme simple d'un modèle.
- La surface topographique n'est pas rigoureusement plane: une bosse ou un creux vont éloigner ou rapprocher le point de mesure du pôle négatif du minerai et déformer la courbe puisque celle-ci est fonction de la profondeur h .
- Les résistivités très variables des terrains encaissants affectent la répartition des potentiels en surface.

Si l'interprétation quantitative est indispensable pour l'implantation de forages lors de la recherche d'un gisement aveugle dont on ne connaît ni la forme, ni la profondeur, ni le pendage, elle n'est pas nécessaire dans notre cas.

En effet, les rapports miniers décrivent la géologie de la région et la nature du filon; on connaît son pendage et l'épaisseur approximative de la minéralisation; les roches affleurent presque partout: il n'y a donc pas lieu d'interpréter chaque profil.

Pour nous, le problème est autre; il s'agit de repérer un filon encaissé dans une série de gneiss et de schistes très altérés, sans niveau repère. Or, la succession des couches géologiques diffère d'une crête à l'autre; leur épaisseur est variable. Un changement de leur direction, même faible, dévie le filon de plusieurs centaines de mètres vers l'aval ou vers l'amont. Le fauchage des crêtes le rejette systématiquement vers le bas. La galène oxydée est difficile à voir.

La P.S. est donc indispensable pour la mise en évidence d'une zone électriquement anormale; les mesures sont rapides et l'on effectue aisément deux profils par jour de plus d'un kilomètre chacun, même avec une dénivellation de 1'000 mètres et une longue marche d'approche.

Cependant, il faut se souvenir que les causes possibles d'anomalie sont multiples; il peut s'agir:

- de sulfures plus ou moins massifs,
- de graphite,
- de la conjugaison de l'un et de l'autre dans les zones les plus écrasées (mylonites).

Il faudra donc, pour interpréter nos résultats, disposer d'informations complémentaires. On peut attendre une aide importante de futures études structurales et des analyses géochimiques. Pour l'instant, constatons simplement que la minéralisation a suivi les plans de failles et rempli les fissures. Dans le Wilerbach, elle est intercalée dans une série de gneiss et de schistes mylonitiques. Au microscope, on observe l'alignement et la déformation très prononcés des minéraux: plagioclases tordus, étirés et fragmentés, clivages de fractures, recristallisation, etc.; le graphite en filonnets plissotés y est par endroits abondant, ainsi que des minéraux opaques.

A l'échelle de l'échantillon, on observe des feuillettes de graphite extrêmement minces qui expliquent cependant l'amplitude des anomalies, avec ou sans minéralisation.

De ce fait, les anomalies géophysiques ne font qu'attirer notre attention sur des zones potentiellement intéressantes, mais il est impossible, d'après les seuls résultats obtenus par la P.S., de tirer une conclusion sur la nature et l'origine des anomalies. C'est pourquoi, sur ou entre les profils P.S., nous avons prélevé quelque 500 échantillons de sols que nous avons fait analyser quantitativement pour cinq éléments: seuls les résultats de cette étude pourront confirmer ou non la présence de certains métaux.

Quoi qu'il en soit, la méthode de la polarisation spontanée a permis de localiser une anomalie et de limiter ainsi la longueur des profils géochimiques et le nombre des prélèvements. Elle a attiré notre attention sur une zone que, sans les résultats P.S., nous n'aurions probablement pas étudiée.

SECONDE PARTIE

Prospection géochimique par échantillonnage de sols sur l'anomalie de polarisation spontanée.

CHAPITRE 5 –

CONSIDERATIONS GENERALES

5.1 INTRODUCTION

Si les résultats de polarisation spontanée ont montré des anomalies spectaculaires – il est rare, en effet, de mesurer des différences de potentiel qui atteignent, sur la plupart des profils, -600 à -900 mV et des gradients dépassant plusieurs centaines de mV en 15 mètres –, encore faut-il tenter d'expliquer l'origine de ces anomalies. Pour cela, le but restant la découverte de métaux, il faudra distinguer les anomalies P.S. dues à la présence de graphite de celles qui sont dues à des sulfures métalliques.

Aussi avons-nous prélevé, entre Goppenstein et le pied du Langgletscher, des échantillons de sols sur les anomalies et les avons-nous fait analyser quantitativement pour cinq éléments.

Dès la fin de la campagne géophysique de 1974, nous avons récolté 224 premiers échantillons, représentant cinq profils géochimiques appelés Go I à Go V. Ceux-ci répartissent, irrégulièrement, entre la base des parois de Goppenstein et le Tennera. Trois d'entre eux restent en dehors de la zone minéralisée mais recoupent des anomalies géophysiques; nous espérons y déceler de nouveaux indices. Les deux autres profils traversent le filon; ils devaient montrer, compte tenu d'une forte pente et d'une érosion rapide, l'amplitude et la largeur d'anomalies géochimiques dues à la présence de filonnets de galène associée à d'autres sulfures.

Cette première étape fut également l'occasion de comparer les résultats de deux laboratoires d'analyses. Tous les échantillons pairs de chaque profil ont été envoyés en Angleterre pour le dosage du cuivre (Cu), du plomb (Pb), du zinc (Zn), de l'argent (Ag) et du nickel (Ni), tandis que les numéros impairs ont été analysés au Canada pour Cu, Pb, Zn, Ag et Mo (molybdène). Bien que les deux laboratoires sollicités utilisent la même méthode d'analyse quantitative – l'absorption atomique – et garantissent une bonne précision dans les résultats, ils se différencient dans le traitement préparatoire de l'échantillon.

Les premières analyses ont donné des résultats intéressants: d'une part, elles ont mis en évidence des anomalies d'un ou de plusieurs éléments sur les fortes réactions P.S. ou en dehors de celles-ci; d'autre part, elles permettent de comparer les résultats des deux laboratoires.

Ces deux points feront l'objet du chapitre suivant.

Encouragés par ces résultats positifs, nous avons établi, l'été suivant, huit profils géochimiques supplémentaires (Go VI à Go XIII), totalisant 271 prélèvements de sols. Ces profils complètent l'étude sur l'ensemble de la zone anormale géophysique. Les échantillons de Go VIII à Go XIII n'ont été analysés qu'en Angleterre, alors que ceux de Go VI et Go VII étaient séparés en trois parts pour être analysés en Angleterre, au Canada et à l'Université de Lausanne.

Nous avons effectué l'analyse de ce troisième lot grâce à une méthode semi-quantitative, utilisée par le „US Geological Survey”. La description de cette méthode et la comparaison des résultats seront traitées dans un chapitre ultérieur.

5.2 SITUATION DES PROFILS

La figure 12 représente la situation des treize profils géochimiques. Leur direction, leur longueur, la distance entre les prises de sols ont été choisies non seulement en fonction de la direction générale et de l'épaisseur présumée de la minéralisation, mais aussi en fonction de la dimension de la zone anormale P.S. et de la largeur de ses pics. Ainsi, alors que les profils sont souvent espacés de plusieurs centaines de mètres, les prélèvements sur chacune des lignes peuvent être très proches les uns des autres. C'est pourquoi nous parlons de „profils géochimiques” et non de carte géochimique.

Certains d'entre eux reprennent le tracé des mesures de polarisation spontanée, d'autres s'en écartent. Tous recourent la zone anormale P.S. et traversent une ou plusieurs de ses anomalies.

La longueur des profils varie de 324 mètres (Go II) à 1'080 mètres (Go VIII). La distance en ligne droite séparant deux profils est comprise entre 350 mètres et plus de 2'700 mètres; l'espacement entre les prises est le plus souvent de 30 ou de 15 mètres. Il arrive cependant qu'il soit ramené à 10, 5 ou 2,5 mètres sur les anomalies P.S. très étroites.

La numérotation des profils correspond à l'ordre dans lequel nous les avons établis. En tout, 495 échantillons de sols, analysés chacun pour cinq éléments, soit près de 2'500 analyses quantitatives, constituent la base de cette étude géochimique.

5.3 LA PRISE DES ECHANTILLONS

La qualité des sols varie fortement le long d'un profil. On passe en effet, de bas en haut, de sols forestiers riches en débris organiques, parfois recouvrant des „pierriers”, à des sols morainiques et à des sols d'éboulis plus ou moins fins. Sur les crêtes, il fallait souvent même gratter autour de l'affleurement pour obtenir la quantité de sol désirée, 30 à 40 grammes environ. C'est dire que, même avec la tarière à main que nous avons utilisée pour prélever les sols, nous n'avons pas pu respecter partout la profondeur de 30 cm que nous nous étions fixée.

Pour mieux repérer nos prises géochimiques, nous avons signalé à la peinture l'emplacement et le numéro de certains échantillons, en plus de l'altitude prise tous les deux prélèvements. L'absence de repères sur le terrain et de points cotés sur la carte ne nous permettait pas, en effet, de corriger l'altimètre. La photo 9 montre l'une de ces marques, la tarière et deux sacs en plastique contenant chacun une trentaine d'échantillons de sols.

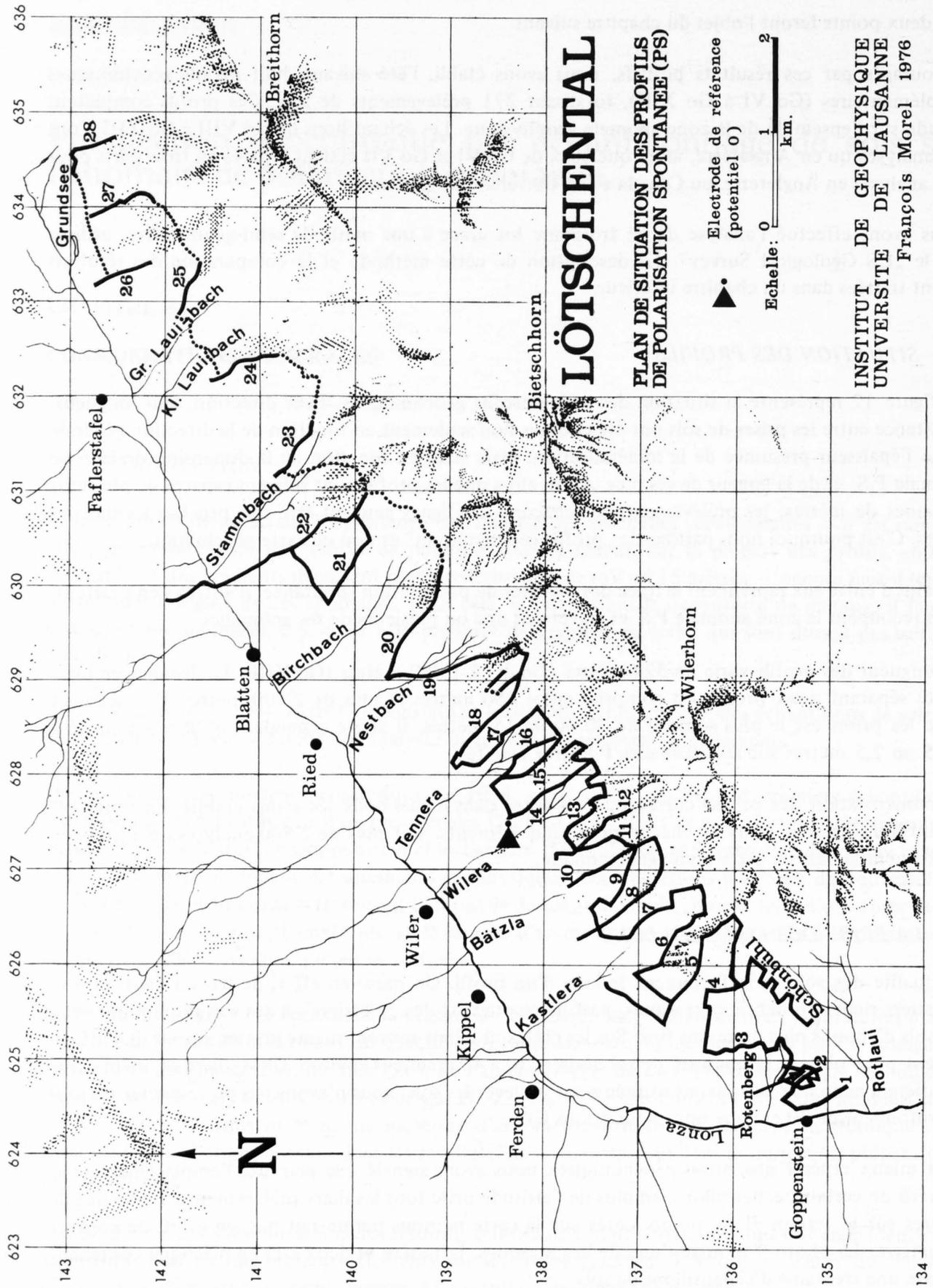


Figure 12



Photo 9:
tarière et marque laissée sur le terrain

Les sachets imperméables ont pour avantage de prendre, une fois roulés, très peu de volume, mais pour inconvénient de conserver l'humidité des sols. C'est pourquoi, par la suite, nous avons remplacé ces sachets par des enveloppes en papier spéciales pour la géochimie, provenant d'Angleterre, qui, bien que plus fragiles, permettent au sol de sécher rapidement et d'être tamisé dès la fin de la prospection.

Les erreurs topographiques dues à l'altimètre et le manque de points de repère des cartes expliquent probablement certains décalages entre anomalies géochimiques et géophysiques.

Cependant, grâce aux marques de peinture laissées sur le terrain, il est toujours possible de retrouver après coup une anomalie intéressante. C'est d'ailleurs de cette façon que nous avons découvert la galène dans le Tennera.

5.4 L'ANOMALIE GEOCHIMIQUE

Nous l'avons vu, une direction connue de la minéralisation, une anomalie géophysique bien délimitée et surtout un relief très prononcé nous ont incités à établir une prospection géochimique selon des lignes de prélèvements et non selon une maille plus ou moins régulière. Il s'agit d'une prospection tactique qui a pour but la découverte de la prolongation d'une minéralisation partiellement connue. Puisque l'échantillonnage des sols n'est pas réparti au hasard, que certains profils traversent la zone minéralisée alors que d'autres ne la traversent pas, que la longueur des profils et la distance entre les prises varient, le traitement statistique des résultats d'analyses pose un certain nombre de problèmes.

Cependant, pour éviter d'introduire trop d'arbitraire dans l'interprétation ou, mieux encore, pour nous assurer de la valeur de nos a priori, nous avons voulu exécuter un certain nombre de „calculs objectifs”, sous la conduite du professeur M. Vuagnat de l'Université de Genève. Nous avons d'abord calculé la distribution statistique de chaque élément, profil par profil, sur l'ensemble des analyses faites en Angleterre. Ce travail représente le calcul par ordinateur de 60 distributions (le nickel n'a pas été pris en considération).

Le tableau 3 indique que tous les éléments – à l'exception de Ag du profil Go VI qui n'a que deux teneurs différentes – obéissent à une distribution normale des valeurs brutes ou du log des valeurs (pour certaines distributions, on peut accepter à la fois l'hypothèse de normalité et de lognormalité). Pour parvenir à ce résultat, il a fallu parfois éliminer une ou plusieurs teneurs très élevées qui faussent la distribution (par exemple, toutes les valeurs du zinc supérieures à 330 ppm du premier profil).

Cette décision est évidemment arbitraire: on ne sait, en effet, quelles seront les valeurs anormales puisque l'on déterminera précisément le seuil d'anomalie statistique à partir de la distribution obtenue. Mais elle se justifie lorsque le nombre d'échantillons est petit et la distribution irrégulière.

Ce travail accompli, il faut définir la valeur du fond géochimique. Celui-ci peut être soit la moyenne arithmétique \bar{x} d'un élément, soit la médiane (valeur séparant le nombre d'observations en deux populations égales), soit le mode (valeur de la variable qui présente la fréquence maximum).

Pour traiter nos données, nous avons pris la moyenne arithmétique \bar{x} .

Il faut ensuite choisir un seuil d'anomalie, limite supérieure des valeurs admises comme normales. Comme le préconisent de nombreux traités de géochimie, nous avons pris la limite statistique définie par $\bar{x} + 2S$, où S est l'écart-type et vaut:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

X_i : valeur pour chaque point analysé

N : nombre d'échantillons

Tableau 3 Tableau des distributions normales ou lognormales, profil par profil, des résultats d'analyse géochimique (avec ou sans suppression d'échantillons); valeurs statistique et intuitive de la limite supérieure du seuil d'anomalie.

No. du profil	Elements	Nombre d'échantillons	Distribution normale lognormale		Moyenne arithmétique (\bar{x}) (ppm)	Seuils d'anomalie (ppm)	
						$\bar{x} + 2S$	intuitif
Go I	Pb	29		●	173	268	250
	Zn	21 (suppression 34, 36, 40, 42, 44, 46, 50, 52)		●	211	271	290
	Cu	29		●	122	260	160
	Ag	29		●	2,3	3,6	3,5
Go II	Pb	14 (suppression 30)		●	266	343	300
	Zn	15	●	●	236	306	300
	Cu	15	○	●	50	109	150
	Ag	15	○	●	2,2	3,6	2,5
Go III	Pb	27		●	389	1087	430
	Zn	27		●	294	464	260
	Cu	24 (suppression 44, 46, 48)		●	43	116	150
	Ag	27		●	2,5	6,1	3
Go IV	Pb	25	○	●	78	142	150
	Zn	25		●	98	172	160
	Cu	25		●	38	69	70
	Ag	25	○	●	2,1	5,2	3,5
Go V	Pb	15		●	300	1124	430
	Zn	15		●	406	826	400
	Cu	10 (suppression 12, 18, 20, 22, 26)		●	65	86	200
	Ag	15	○	●	2,3	7	4,5
Go VI	Pb	25	○	●	78	105	105
	Zn	25		●	190	274	250
	Cu	25	○	●	67	106	105
	Ag	—	—	—	1,7	—	—
	Mo	25	○	●	6	8,8	8,5
Go VII	Pb	34		●	147	342	250
	Zn	34		●	389	728	360
	Cu	34	○	●	60	87	85
	Ag	34	○	●	2,3	3,6	3
	Mo	34	●	●	5,4	8,1	9
Go VIII	Pb	65		●	87	179	150
	Zn	65		●	126	245	230
	Cu	65		●	33	78	75
	Ag	65		●	1,5	2,6	3
	Mo	65	●	●	5,2	8	9
Go IX	Pb	53		●	124	270	250
	Zn	53		●	187	328	300
	Cu	51 (suppression 7, 8)		●	34	105	100
	Ag	53	○	●	1,6	2,5	2,5
	Mo	53		●	4,9	7,7	8
Go X	Pb	51	○	●	71	139	125
	Zn	51		●	133	367	250
	Cu	51		●	34	107	80
	Ag	51		●	1,7	3,2	3
	Mo	51		●	4,6	9,1	9
Go XI	Pb	54 (suppression 38, 39, 42, 48, 49, 50)		●	75	136	150
	Zn	51 (suppression 39-42, 47-51)		●	122	244	250
	Cu	59 (suppression 21)		●	36	105	90
	Ag	60		●	2	4,3	3
	Mo	59 (suppression 46)		●	4,8	8,1	8
Go XII	Pb	49 (suppression 1)		●	106	168	170
	Zn	47 (suppression 1, 11, 12)		●	266	404	350
	Cu	50		●	96	156	160
	Ag	50	●	●	3,3	5,8	4,5
	Mo	50		●	6,9	11,8	12
Go XIII	Pb	46		●	94	195	180
	Zn	46		●	214	421	350
	Cu	46		●	81	165	160
	Ag	46	○	●	2,3	3,3	3,5
	Mo	46		●	5,9	11,7	11

○ : probable

● : fortement probable

Pour une distribution normale sur les valeurs brutes ou sur leur logarithme, 95,44 % des résultats constituent le bruit de fond. HAWKES et WEBB (1962) vont même plus loin: ils appellent „concentrations anormales possibles” les teneurs comprises entre $\bar{x} + 2S$ et $\bar{x} + 3S$ et „anomalies probables” les teneurs supérieures à $\bar{x} + 3S$ (dans ce cas, 99,74 % des valeurs sont normales).

Notre tableau 3 indique les valeurs du seuil d'anomalie $\bar{x} + 2S$. Il faut noter que plus la courbe de distribution est large, plus l'écart-type est grand.

Or, un fait est frappant: le seuil d'anomalie ainsi calculé varie très fortement d'un profil à l'autre; il passe ainsi pour le plomb de 105 ppm (Go VI) à 1'124 ppm (Go V), pour le zinc de 172 ppm (Go IX) à 826 ppm (Go V). L'écart s'atténue pour les autres éléments, mais reste important. Ces différences énormes expliquent pourquoi il a été impossible de calculer un seuil d'anomalie par élément sur l'ensemble des données. Certains profils n'auraient fait apparaître presque que des anomalies, alors que d'autres, bien que montrant des pics, n'en auraient révélé aucune.

Ces écarts entre les seuils d'anomalie pour chaque profil proviennent non seulement d'un certain nombre de très hautes valeurs, mais aussi de la teneur moyenne d'un élément, qui varie facilement d'un profil à l'autre. Par exemple, sur le profil Go XII, la teneur la plus basse pour le zinc est de 160 ppm, alors que sur le profil Go VIII, elle n'est que de 40 ppm.

Lorsqu'on étudie de petits corps minéralisés, il est courant de prendre la médiane comme valeur de background et d'estimer anormales le 2,5 % des valeurs, après élimination des valeurs aberrantes [erratic high values, HAWKES et Webb (1962)]. Cette limite, à notre avis, est beaucoup trop restrictive pour le cas particulier de Goppenstein, car non seulement les profils y sont souvent très courts et leurs extrémités peu éloignées de la zone minéralisée, mais les échantillons n'y sont pas équidistants; ils sont parfois très rapprochés dans l'anomalie géochimique signalée par l'anomalie P.S. Si dix échantillons sur trente sont prélevés dans la zone minéralisée, il est logique de considérer que 33 % des teneurs sont anormales; cela d'autant plus qu'un autre facteur intervient dans le Löttschental: la pente, qui favorise la dispersion des éléments, et l'étalement de l'anomalie.

Ainsi, un seuil d'anomalie calculé statistiquement, sans tenir compte de facteurs tels que pente, distance entre les profils, espacement variable entre les échantillons, etc., paraît souvent beaucoup trop élevé. Un exemple: les valeurs de 740 ppm pour le plomb dans le profil Go V seraient considérées comme normales ($\bar{x} + 2S = 1'124$ ppm), alors que la moyenne sur les six derniers échantillons prélevés au-dessus du filon est de 102 ppm.

C'est pourquoi, finalement, nous avons opté pour des „seuils d'anomalie intuitifs”, faisant nôtre la remarque de HAWKES et WEBB (1962): „A reliable interpretation of anomalies in terms of ore requires a combination of complex human experience and a capacity to recognize significant geometrical correlations. Pure mathematical analysis, therefore, is not likely to replace the subjective interpretive talents of the exploration geologist for some time to come”.

Les valeurs de ces seuils sont également notées sur le tableau 3. Nous constatons qu'ils diffèrent, non seulement pour un même élément, d'un profil à l'autre, mais aussi – cela se voit sur les figures 13 à 16 – sur les deux séries d'analyses d'un même profil. Cette différence s'explique par le décalage qui peut exister entre les valeurs normales de celles-ci (cf. analyses de l'argent, figure 16). Si les deux séries se confondent, comme pour le cuivre, le seuil est le même ou presque.

Le choix d'un seuil anomal par élément et par profil ôte tout sens à l'établissement d'une carte des isoteneurs. La carte que nous présentons (planche 2) ne fait apparaître que les valeurs anormales telles qu'elles ressortent de chaque profil. Une teneur donnée, anormale sur un profil, peut ne pas l'être sur l'autre. Cette carte met en évidence les analogies et les dissemblances entre les distributions des éléments et des potentiels. Elle souligne une importante anomalie entre le Wilerbach et le sud-est de Blatten.

CHAPITRE 6 –

ANALYSES GEOCHIMIQUES DES ECHANTILLONS DES PROFILS Go I A Go V, SITUÉS ENTRE GOPPENSTEIN ET LE TENNERA, ET COMPARAISON DES RESULTATS DE DEUX LABORATOIRES

6.1 INTRODUCTION

Il aurait été possible de présenter les profils Go I, Go II, Go III et Go V de manière à faire apparaître la corrélation ou l'absence de corrélation entre les anomalies de six éléments (nous utiliserons cette manière de faire, au chapitre 7, pour les profils Go XI et Go XII). Ce mode de présentation n'aurait pas permis de comparer, pour chaque élément, les deux séries d'analyses quantitatives réalisées

- l'une par un laboratoire anglais, Lea Cross Geophysical Co. LTD (Zn, Pb, Cu, Ag et Ni), qui a traité les numéros pairs des 224 échantillons,
- l'autre par un laboratoire canadien, Barringer Research LTD (Zn, Pb, Cu, Ag et Mo), qui a traité les numéros impairs.

(Nous désignerons le premier de ces laboratoires par la lettre A, le second par la lettre B.)

Les figures 13 à 16 permettent de comparer les résultats obtenus par les laboratoires A et B pour le zinc, le plomb, le cuivre et l'argent, et ceci pour chacun des quatre profils Go I à Go V.

Dans la figure 17, montrant les distributions de Ni et de Mo, nous avons adopté, par souci d'unité, le même mode de représentation.

Dans chaque série d'analyses, nous avons dédoublé quatre échantillons pour vérifier la reproductibilité des résultats.

Les méthodes de préparation des échantillons et d'analyse de chacun des deux laboratoires sont les suivantes:

Laboratoire A: Séchage du sol à l'air, broyage et tamisage à environ 210 microns. Après attaque à l'acide nitrique chaud, l'échantillon est analysé sur un spectromètre à absorption atomique Techtron AA₅. La précision de l'analyse est de $\pm 5\%$ pour Pb, Zn, Cu et Ni et du demi-ppm pour Ag. La quan-

tité de sol analysée est de 1 gramme pour l'argent et de 0,2 gramme pour les autres éléments. Ces résultats sont donnés au demi-ppm pour Ag, au ppm pour Mo (analysé dès le profil Go VI, à la place de Ni) et à 5 ppm pour Ni, Cu, Pb et Zn.

Laboratoire B: Le sol est séché puis tamisé à une fraction égale ou inférieure à 210 microns (tamis en nylon de 80 fils par pouce linéaire). L'attaque du sol se fait par $\text{HClO}_4/\text{HNO}_3$ sur 250 mg, sans élimination préalable de la matière organique. La précision de l'analyse est de $\pm 10\%$. Les résultats sont donnés au ppm pour Cu, Pb, Zn et Mo et à 2/10 de ppm pour Ag.

6.2 COMPARAISON DES RESULTATS, ELEMENT PAR ELEMENT

Avant d'effectuer cette comparaison, il convient de rappeler que, dans l'ensemble, les échantillons analysés par A et par B ne sont pas les mêmes: il s'agit d'échantillons voisins, ceux confiés à A alternent sur chaque profil avec ceux confiés à B. Cette disposition explique certainement une partie des divergences.

Le zinc (figure 13):

Sur le profil Go I, abstraction faite de l'échantillon 57 où les valeurs en Pb et Zn sont très élevées, les courbes des deux laboratoires sont très semblables: quatre pics se superposent et ont, approximativement, la même amplitude.

Sur le profil Go II, où la distance entre les prises varie de 2,5 à 20 mètres, la corrélation entre les deux distributions n'est pas bonne. Alors que les analyses de B montrent une forte anomalie sur la fin du profil, celles de A présentent des teneurs plus constantes, qui ne s'écartent guère de la valeur du background. Il y a inversion des écarts entre les deux moitiés du profil.

Sur le profil Go III, la similitude des courbes est bonne, ainsi que sur le profil Go V, où l'on remarque des valeurs légèrement plus élevées chez B.

Le plomb (figure 14):

Plus irrégulière que pour le zinc, la teneur en plomb est plus difficile à comparer entre les deux séries. A part l'échantillon 57, il n'y a pas grand-chose à remarquer sur le premier profil, sinon que la teneur en Pb fluctue davantage en A qu'en B.

Sur les trois autres profils, la comparaison devient plus complexe. Sur Go II, les analyses de B mettent en évidence deux anomalies en Pb ne ressortant pas des analyses de A, qui, elles, font apparaître, à la fin du profil, une forte anomalie que B ne confirme pas.

Sur le profil Go III, A et B signalent une importante anomalie au passage de la tranchée (échantillons 38 à 51), mais les résultats de B montrent deux anomalies supplémentaires, peu marquées pour A, où il y a cependant une légère augmentation des teneurs à ces deux endroits (échantillons 33 et 17).

Quant à Go V, B met en évidence deux anomalies distinctes alors que A n'en signale qu'une. Là, comme d'ailleurs pour la seconde anomalie de Go II, les résultats ne sont pas nécessairement contradictoires: on peut imaginer des teneurs locales différentes dues à de très minces minéralisations, d'autant plus que le plomb est un élément relativement immobile en milieu siliceux.

Analyses géochimiques

Distribution du zinc

Echantillons de sol

- Echantillons pairs Lab. A
- Echantillons impairs Lab. B

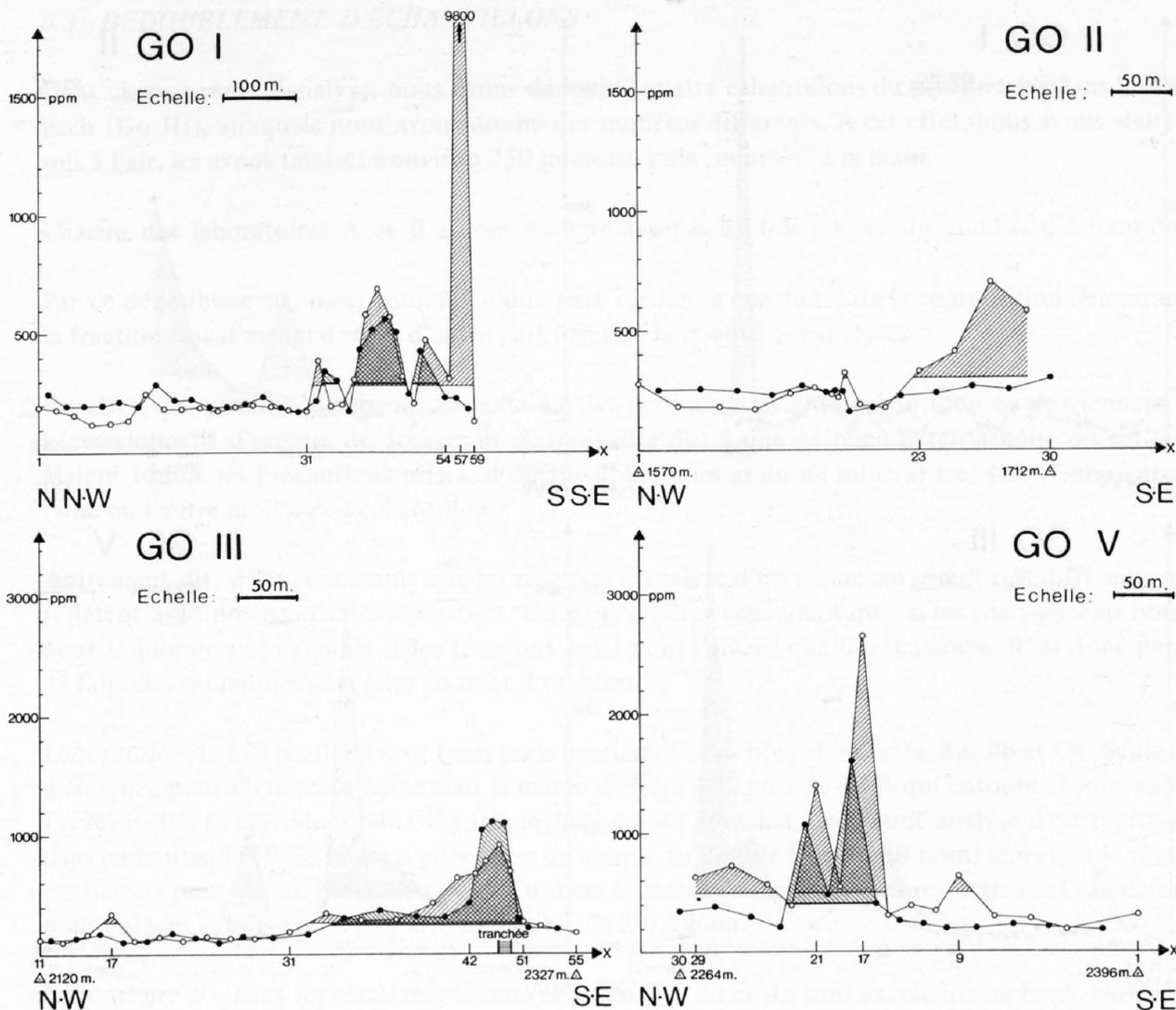
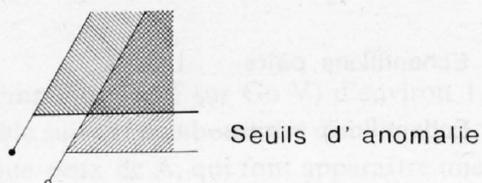


Figure 13

Analyses géochimiques

Distribution du plomb Echantillons de sol

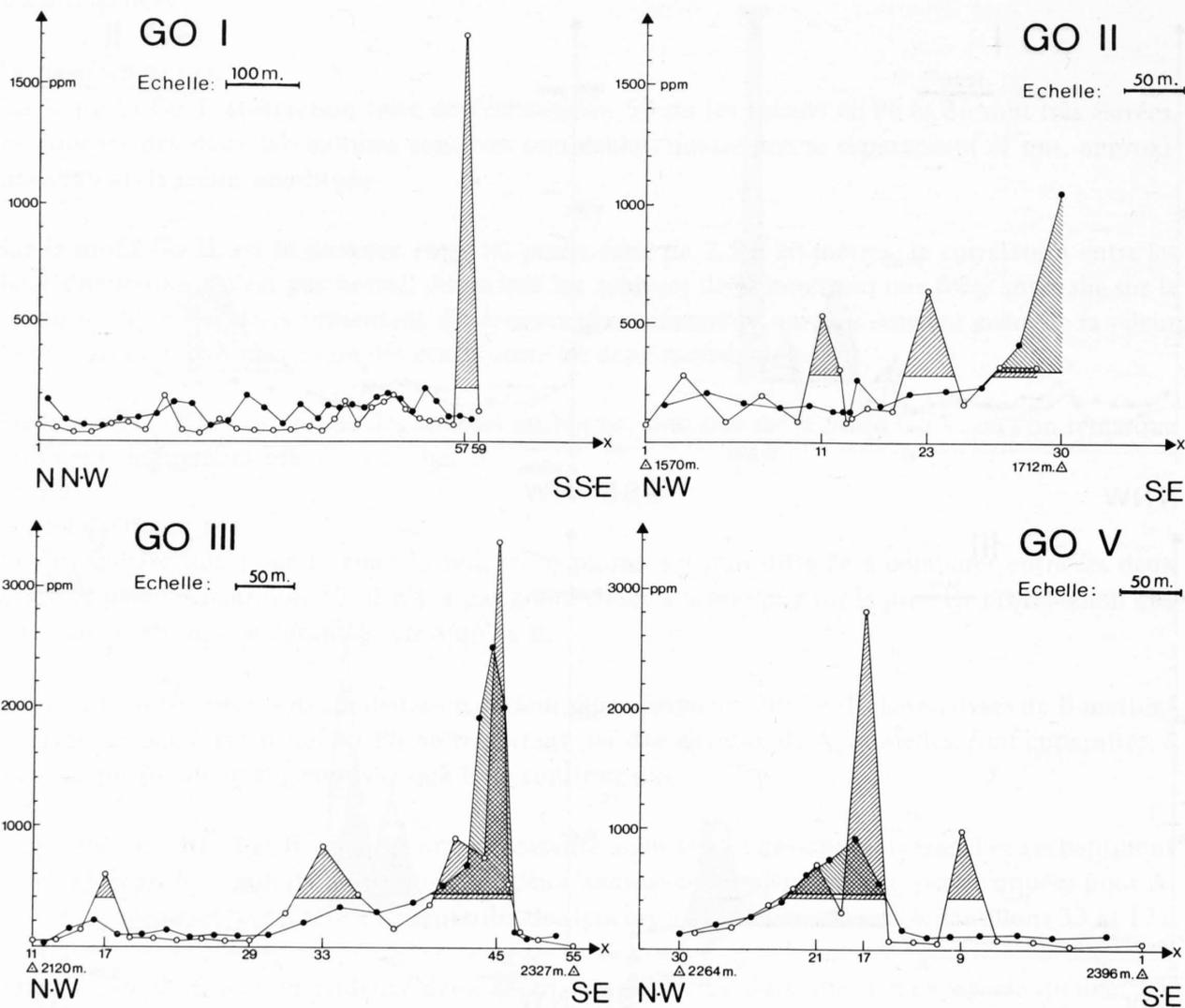
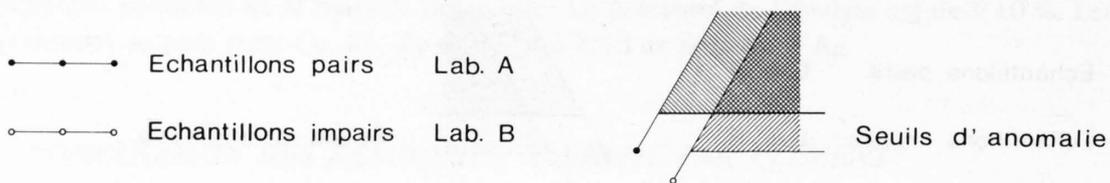


Figure 14

On constate qu'en moyenne les valeurs du bruit de fond sont légèrement plus basses pour B que pour A.

Le cuivre (figure 15):

Les résultats sont, à tout point de vue, excellents. Il n'y a ni décalage, ni anomalie différente entre les deux courbes: chaque série confirme ainsi les résultats de l'autre.

L'argent (figure 16):

Les deux distributions montrent un écart systématique (sauf sur Go V) d'environ 1,1 ppm. C'est dire que la teneur en Ag passe du simple au double suivant le laboratoire qui l'analyse. On remarque aussi que les résultats de B sont plus réguliers que ceux de A, qui font apparaître une anomalie sur Go II, alors que B en signale une sur Go V.

6.3 DEDOUBLEMENT D'ECHANTILLONS

Dans chaque série d'analyse, nous avons dédoublé quatre échantillons du profil établi dans le Wilerbach (Go III), auxquels nous avons donné des numéros différents. A cet effet, nous avons séché les sols à l'air, les avons tamisés à environ 250 microns, puis „quartés” à la main.

Chacun des laboratoires A et B a donc eu à analyser deux fois un certain nombre d'échantillons.

Par ce dédoublement, nous voulions d'une part vérifier la constance de la composition chimique de la fraction fine d'un sol donné, d'autre part juger de la qualité des analyses.

En effet, des résultats divergents obtenus sur les deux moitiés d'un échantillon ne proviennent pas nécessairement d'erreurs de dosage; ils peuvent être dus à une extrême hétérogénéité du sol testé. Malgré toutes les précautions prises, il est possible qu'un grain de minerai très pur vienne enrichir l'une ou l'autre moitié de l'échantillon.

Autrement dit, il est concevable que les résultats d'analyse d'un même sol soient très différents mais reflètent avec précision sa composition. On peut espérer cependant que, si les analyses sont bonnes pour le plomb, par exemple, elles le seront aussi pour l'argent qui lui est associé. Il est donc permis de faire des remarques générales au sujet du tableau 4.

Laboratoire A: Les résultats sont bons pour les éléments les plus abondants, Zn, Pb et Cu. Seule une différence pour Pb dépasse nettement la marge d'erreur acceptée de 10 % qui entoure chaque valeur. En revanche, la reproductibilité est très mauvaise pour le nickel, où aucune analyse n'est reproduite dans les limites de 10 %. L'une d'elles passe du simple au double (90 et 180 ppm) alors que le résultat est parfait pour Ag et Zn et bon pour Cu dans le même échantillon. Les résultats sont satisfaisants pour l'argent si l'on admet une erreur possible de $\pm 0,5$ ppm.

Laboratoire B: Tous les résultats obtenus pour Cu, Pb, Zn et Ag sont excellents ou bons. Non seulement ils entrent tous dans une limite de précision de ± 10 %, mais, s'il existe une différence, elle est très faible dans la majorité des cas. Pour Mo, deux résultats sur quatre sont mauvais: on passe donc d'un extrême à l'autre. Pour Ag, ils sont bons avec une erreur admise de $\pm 0,5$ ppm.

Analyses géochimiques

Distribution du cuivre

Echantillons de sol

●—● Echantillons pairs Lab. A

○—○ Echantillons impairs Lab. B

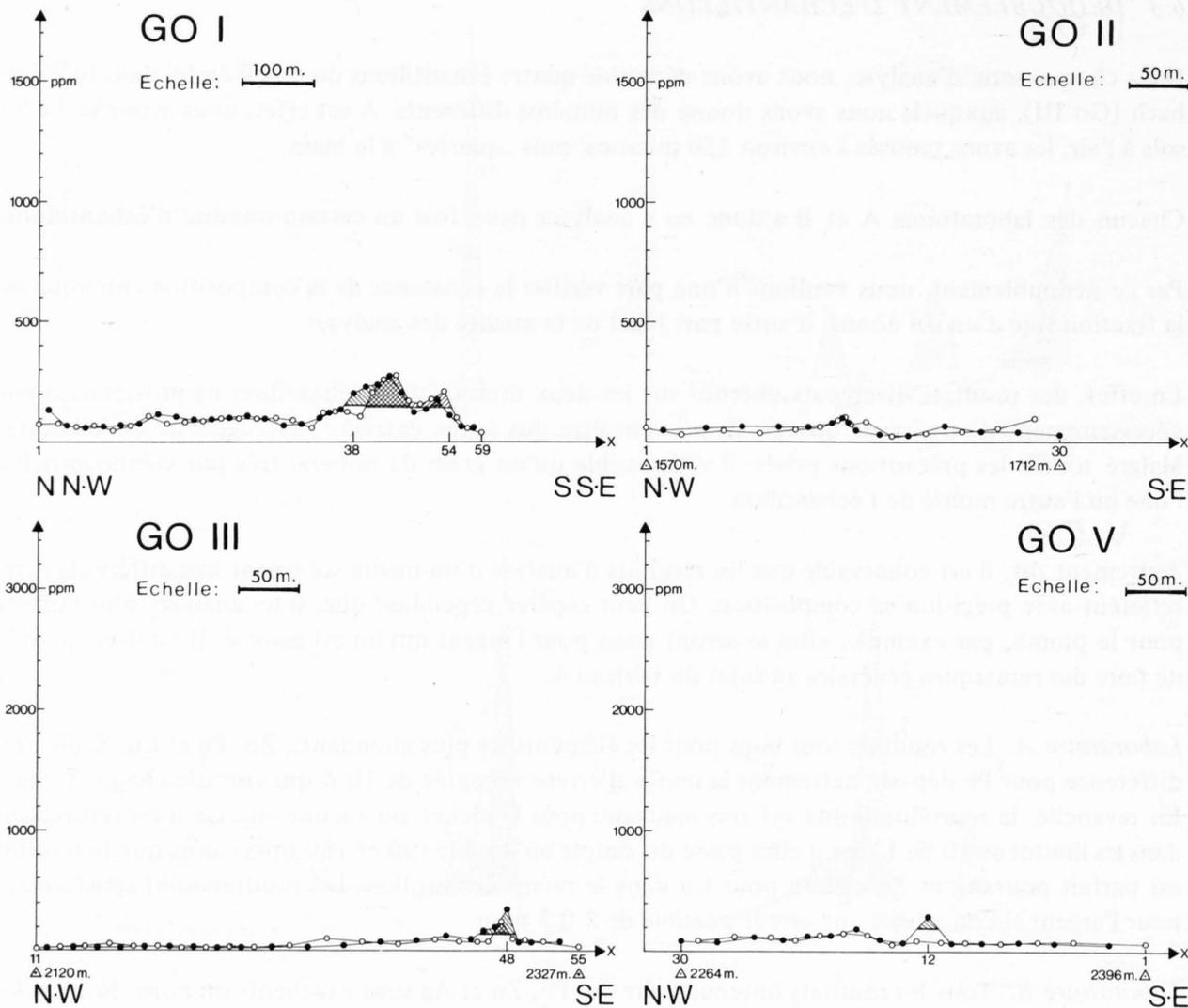
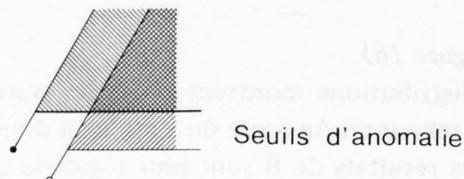


Figure 15

Analyses géochimiques

Distribution de l'argent Echantillons de sol

- Echantillons pairs Lab. A
- Echantillons impairs Lab. B

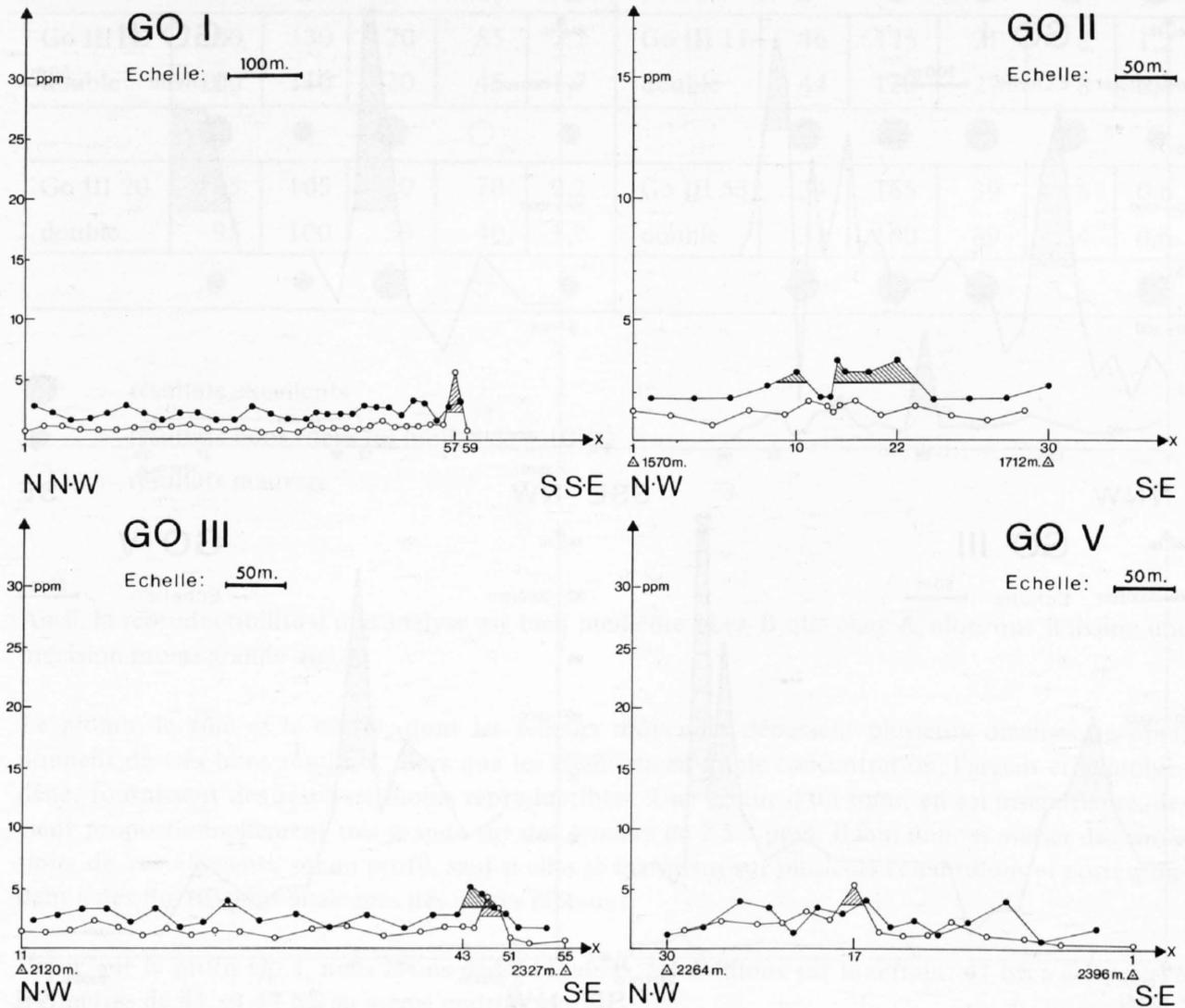
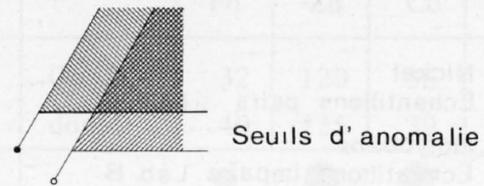


Figure 16

Analyses géochimiques · Echantillons de sol

Distribution du nickel et du molybdène

..... Nickel
 Echantillons pairs Lab. A
 ————— Molybdène
 Echantillons impairs Lab. B

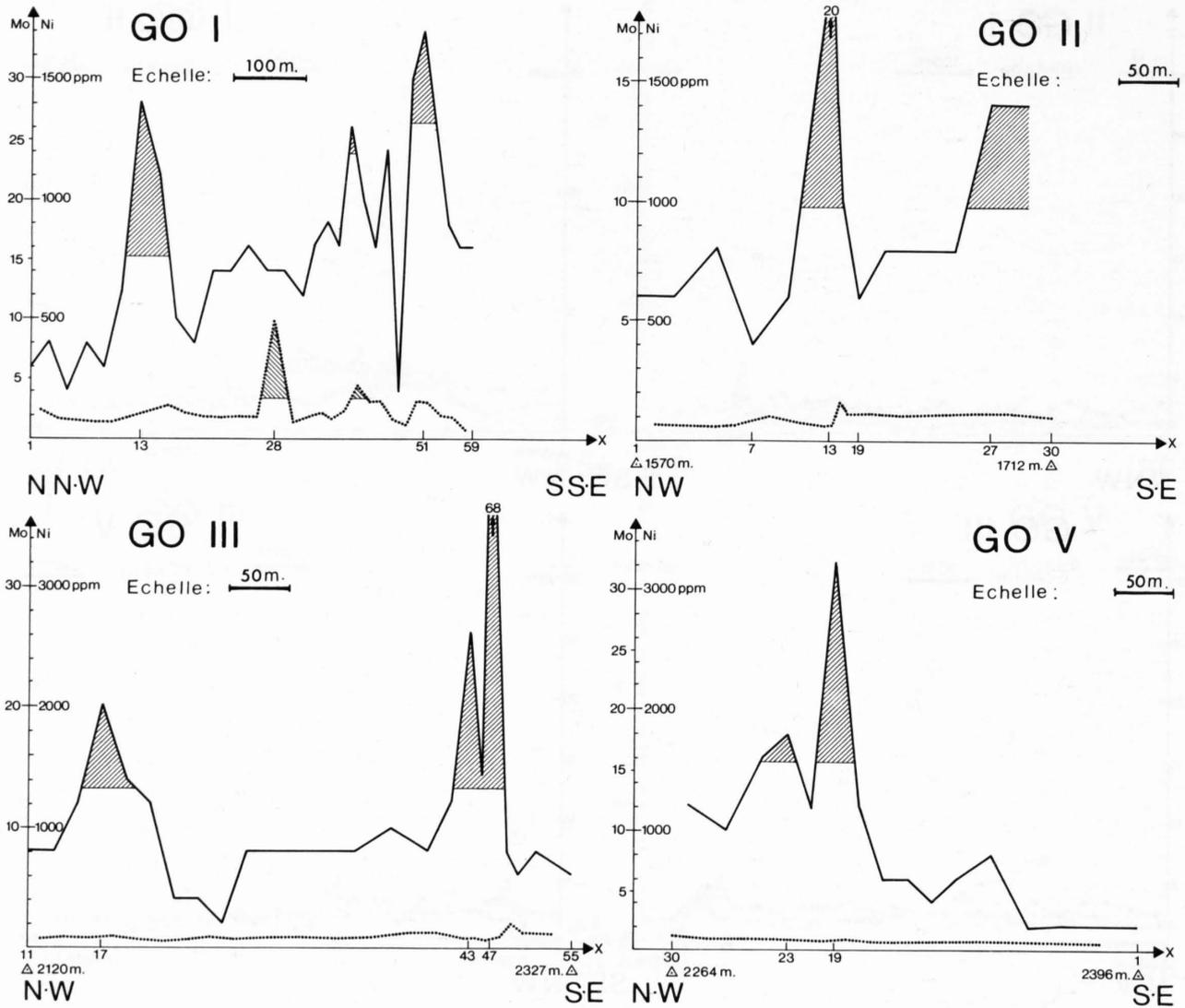
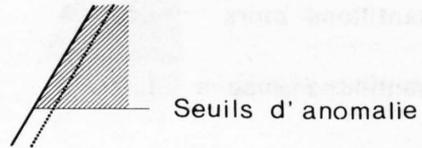


Figure 17

Tableau 4 Dédoublément d'échantillons

Laboratoire A						Laboratoire B					
	Pb	Zn	Cu	Ni	Ag		Pb	Zn	Cu	Mo	Ag
Go III 48	1990	1100	335	90	3,3	Go III 1	32	120	36	10	1,4
double	1980	1350	275	120	4,4	double	40	125	39	6	0,8
	●	●	●	○	○		●	●	●	○	●
Go III 18	100	100	35	90	3,3	Go III 43	800	675	76	26	1,8
double	70	100	30	180	3,3	double	830	680	76	26	1,8
	○	●	●	○	●		●	●	●	●	●
Go III 30	100	130	20	85	2,2	Go III 11	46	125	21	8	1,2
double	100	110	20	45	1,7	double	44	120	22	8	0,4
	●	●	●	○	●		●	●	●	●	●
Go III 20	105	105	30	70	2,2	Go III 55	34	165	39	6	0,6
double	95	100	30	40	1,7	double	33	160	39	4	0,6
	●	●	●	○	●		●	●	●	○	●

- : résultats excellents
- : résultats bons (dans les limites de $\pm 10\%$)
- : résultats mauvais

Ainsi, la reproductibilité d'une analyse est bien meilleure chez B que chez A, alors que B assure une précision moins grande que A.

Le plomb, le zinc et le cuivre, dont les teneurs moyennes dépassent plusieurs dizaines de ppm, donnent de très bons résultats, alors que les éléments en faible concentration, l'argent et le molybdène, fournissent des résultats moins reproductibles. Une erreur d'un ppm, en soi insignifiante, devient proportionnellement très grande sur des teneurs de 2 à 3 ppm. Il faut donc se méfier des variations de ces éléments sur un profil, sauf si elles se marquent sur plusieurs échantillons et correspondent à des fluctuations analogues des autres métaux.

Enfin, sur le profil Go I, nous avons dédoublé deux échantillons sur le terrain: 41 bis a été prélevé à 2 mètres de 41, et 47 bis au même endroit que 47.

Voici les résultats (en ppm):

	Cu	Pb	Zn	Ag	Mo
41	195	135	575	0,8	20
41 bis	200	220	575	1,4	24
47	170	130	325	1,0	4
47 bis	180	87	350	1,2	24

Des cinq éléments, le plomb semble le plus variable d'un sol à l'autre. Dans le second échantillon, la différence de teneur en Mo, qui passe du simple au sextuple, s'explique mal mais atteste les constantes variations de cet élément dans les sols de la région étudiée.

Les importantes fluctuations de Pb peuvent s'expliquer par l'ordre de mobilité relative croissante des éléments dans un milieu siliceux: $Pb < Cu < Mo, Zn, Ag$. Des „mouches” de galène ne donnent naissance qu'à une auréole restreinte, la faible mobilité du Pb s'opposant à une homogénéisation des teneurs dans le terrain.

6.4 ANOMALIES GEOCHIMIQUES ENTRE GOPPENSTEIN ET LE TENNERA

Si les quatre figures 13 à 16 nous ont permis de comparer des résultats d'analyses chimiques sur quatre profils et la figure 17 de voir les distributions de Mo et de Ni, elles vont nous permettre aussi de décrire les anomalies géochimiques décelées entre Goppenstein et le Tennera et de constater leur correspondance avec les mesures P.S.

Le profil Go I emprunte le tracé du profil P.S. no. 1 (cf. figure 5), qui longe la base des parois de Goppenstein. Il se termine peu avant l'entrée d'une ancienne galerie d'exploration, appelée galerie Tiebel, située sur le bord septentrional du Rotlauigraben. C'est un profil horizontal d'une longueur de 740 mètres. La distance entre les mesures est d'abord de 15 mètres, puis de 10 mètres dès l'échantillon 33, point de départ du profil P.S.

Une large anomalie, marquée par trois pics, se dessine pour le zinc entre les prélèvements 31 et 54. Elle coïncide avec des anomalies en cuivre et nickel, et avec une élévation de la teneur en plomb. Quant au molybdène (cf. figure 17), il passe d'un extrême à l'autre, sautant de 4 à 30 ppm pour deux échantillons voisins. Les fortes teneurs (30 et 34 ppm) correspondent à l'anomalie de Zn, qui s'étale sur une distance de 250 mètres, précisément là où la méthode de polarisation spontanée a décelé une chute de potentiel de -300 mV. C'est d'ailleurs à cause de celle-ci que nous avons rapproché les prélèvements de sols à 10 mètres.

On note encore une anomalie en Mo au début du profil, confirmée par une élévation des teneurs en Pb et Zn.

L'échantillon 57 est à mettre à part: les valeurs très élevées en Pb (1'700 ppm), en Zn (9'800 ppm) et en Ag (5,6 ppm) ne s'expliquent guère que par la présence de déblais riches en minerai, entourant les installations toutes proches de la mine.

Il y a donc, dans ce profil, une excellente corrélation entre géophysique et géochimie. Et, ce qui est plus intéressant encore, il semble bien exister des minéralisations, inconnues jusqu'ici, parallèles au filon exploité. Les couleurs d'oxydation des roches, dans ce secteur, attirent d'ailleurs l'attention.

Le profil Go II reprend, en partie, le trajet du profil P.S. no. 2 (cf. figure 5) sur le sentier qui mène à l'exploitation du Rotenberg. La distance entre les prélèvements est très petite sur l'étroite anomalie P.S. de -610 mV.

Bien que les deux séries d'analyses coïncident mal, sans que l'on sache s'il s'agit d'erreurs ou de teneurs extrêmement localisées, il faut signaler deux anomalies en Pb (laboratoire B, échantillons 11 et 23), dont la première est confirmée par une anomalie en Mo, révélée par sept analyses: 4, 6, 14, 20, 14, 10 et 6 ppm.

On remarque également une anomalie en Zn sur la fin du profil (700 ppm), alors que A ne signale ici que deux valeurs anormales en Pb. L'argent n'est anormal que dans les échantillons pairs, au centre du profil.

Si nous n'avions que les résultats de B, nous aurions conclu à deux anomalies de Pb entourant les fortes valeurs P.S. Si, au contraire, nous n'avions que ceux de A, nous ne verrions qu'une seule corrélation entre la P.S. et l'argent, au centre du profil.

D'une longueur de 600 mètres, pour une dénivellation de 270 mètres, *le profil Go III* suit la rive droite du Wilerbach dès 2'057 m et s'arrête peu au-dessus de la tranchée, à 2'327 m. Là de nouveau, la distance entre les échantillons est plus faible sur les deux anomalies P.S., l'une à 2'158 m et l'autre, sur la zone minéralisée, à 2'300 m.

Ce profil géochimique a apporté trois résultats importants:

- D'une part, la première anomalie de P.S., si elle ne correspond pas précisément à une anomalie géochimique, est entourée de valeurs anormales.
- D'autre part, les quelques filonnets visibles de galène associés à la seconde anomalie „marquent” bien géochimiquement.
- Enfin, ce profil met en évidence les effets de la pente, qui atteint par endroits 74 %, sur la forme des anomalies.

Comme le font apparaître les figures 13 à 17, la minéralisation se marque très bien en géochimie, pour cinq éléments, sur une distance d'environ 40 mètres. Le plomb atteint en effet 3'400 ppm, le zinc 1'120 ppm, le cuivre 335 ppm, l'argent 5 ppm et le molybdène 68 ppm, teneur la plus élevée de toutes les analyses.

Les analyses de B mettent encore en évidence deux anomalies en Pb de plus faible amplitude, l'une à 2'150 m, soulignée par une élévation des teneurs en Zn, Mo et Ag, l'autre vers 2'220 m, légèrement marquée pour Cu, Zn et Ag. Ces deux anomalies entourent la première anomalie P.S.

Sur les deux séries d'analyses, on constate, dès 2'215 m, une augmentation générale des concentrations en Pb, Zn et Cu, alors que Ag et Mo restent stables. On peut interpréter cette augmentation comme un effet de la pente qui favorise, par le ruissellement des eaux et par le glissement de la neige, la dispersion des métaux au-dessous de la tranchée. Car, sitôt celle-ci traversée, les teneurs baissent très rapidement pour tous les éléments, qui retrouvent les valeurs du début du profil. Cependant, il est possible aussi qu'il s'agisse d'une zone à sulfures disséminés au mur de la minéralisation. Cette élévation des teneurs se marque sur une distance de 150 mètres et sur une dénivellation de 80 mètres.

On constate encore:

- 1^o) Que le molybdène est anomal à l'aplomb de la minéralisation et semble associé aux autres métaux. Cette observation n'a toutefois pu être confirmée par nos recherches à la microsonde. Peut-être ce molybdène est-il présent dans les roches encaissantes?
- 2^o) Que les teneurs en argent n'atteignent pas, au-dessus de la tranchée, le seuil d'anomalie $\bar{x} + 2S$. Or, l'argent existe dans le filon et sa concentration augmente dans les sols à proximité de celui-ci. Il nous est donc apparu logique d'abaisser dans cette zone le seuil d'anomalie.

Le profil Go IV traverse l'une des anomalies P.S. les plus intenses de l'étude (-996 mV), située entre 2'020 et 2'265 m, un kilomètre au NNW de Schönbühl. En dehors de quelques valeurs éparses élevées, il n'y a aucune anomalie géochimique: il s'agit donc bien ici d'une anomalie P.S. due exclusivement au graphite.

Le profil Go V (cf. figures 13 à 17) suit la rive gauche du Tennera sur une distance de 385 mètres, entre 2'264 et 2'396 m. Il ne traverse que l'anomalie P.S. la plus élevée dans la pente, qui semble être la continuation de celle que nous avons mesurée sur la minéralisation du Wilerbach.

Les analyses géochimiques indiquent manifestement la présence de la minéralisation puisqu'une double anomalie en Zn apparaît entre 2'316 et 2'345 m, marquée également par des anomalies en Cu, Ag et Pb. Le molybdène atteint 32 ppm, mais montre un léger décalage par rapport aux métaux qui l'accompagnent.

Sur le terrain, chacun des deux pics géochimiques correspond à la traversée d'un couloir. Or, dans le premier, nous avons mesuré une anomalie géophysique de -752 mV (2'320 m), trouvé un morceau de galène dans les éboulis et noté la présence de graphite dans des roches brunes. A la même altitude que le second couloir se trouve un long éperon rocheux, à l'extrémité duquel nous avons découvert en place la minéralisation, qui est, peut-être, à l'origine de l'anomalie des échantillons 17 et 18. Mais on retrouve la galène vers 2'370 m, intercalée dans des roches claires, un peu plus haut que ce couloir, sur le flanc NE de la crête séparant le Tennera du Wilerbach. Est-ce le même filonnet que celui de l'éperon? En est-ce un autre? Toujours est-il que les analyses de B signalent une nouvelle anomalie en Zn 80 mètres plus loin que le pic anomal du second couloir (échantillon 9).

On constate, comme sur le profil Go III, que les teneurs métalliques des sols sont plus élevées au-dessous qu'au-dessus des anomalies P.S.: C'est sans doute de nouveau l'effet de la pente.

C'est donc grâce aux résultats de P.S. que nous avons établi un profil géochimique, dont les anomalies nous ont permis de retrouver la minéralisation. Il semble bien y avoir à plusieurs niveaux des filonnets,

dont seul celui qui est associé au graphite donne une forte réaction P.S. Voilà de nouveau l'exemple d'une excellente complémentarité entre les deux méthodes de prospection.

6.5 CONCLUSION

Des cinq premiers profils géochimiques, seul Go IV n'a pas révélé d'anomalie.

Go I et Go II, situés volontairement en dehors de la minéralisation connue, confirment, en partie, les résultats de polarisation spontanée par la présence d'anomalies géochimiques.

Go V nous a permis de retrouver la galène en place et montre que la zone minéralisée se prolonge à l'amont du Wilerbach.

Ces résultats réjouissants nous ont encouragés à poursuivre la prospection géochimique en direction du Langgletscher et à combler, par deux profils, le vide laissé entre Schönbühl et le Wilerbach.

Il est cependant nécessaire de faire ici quelques remarques sur les premiers résultats:

Dans l'ensemble, la correspondance entre les analyses des laboratoires A et B est bonne, d'autant plus qu'il s'agit d'échantillons différents. Cependant, si certaines divergences entre les laboratoires peuvent être causées par des teneurs élevées très locales portant sur un seul échantillon, il en est par contre d'autres, plus étalées, que l'on ne peut expliquer que par des erreurs d'analyse, puisque les valeurs élevées ne se marquent que sur l'une des séries. L'exemple le plus frappant est l'anomalie de zinc de la fin du profil Go II, où les quatre derniers échantillons sont anomaux pour B (640, 410, 700 et 580 ppm), alors qu'ils ne le sont pas pour les échantillons intercalaires analysés par A (235, 260, 245 et 295 ppm).

Quant aux éléments en faible concentration (argent), les laboratoires semblent très optimistes sur la précision des analyses.

D'autre part, la teneur moyenne d'un élément varie d'un laboratoire à l'autre sur le même profil. Ainsi, sur les 25 échantillons alternés de Go IV qu'ont analysés les deux laboratoires, la teneur en Ag est deux fois plus élevée pour A que pour B et le plomb passe de 78,4 ppm (A) à 42,1 ppm (B). Le zinc, par contre, monte de 98 ppm (A) à 122 ppm (B). En revanche, la moyenne du cuivre est la même pour les deux laboratoires. Bien qu'elles n'aient guère d'importance si l'écart moyen reste le même, ces différences montrent que les résultats, malgré leur apparente précision, n'ont qu'une valeur relative pour la totalité d'un élément dans un sol donné.

Enfin, si les teneurs moyennes du bruit de fond sont, en général, plus basses chez B que chez A, c'est l'inverse que l'on observe pour les valeurs anomaux. Cette constatation se vérifiera dans les analyses comparatives des échantillons du profil Go VII, que nous décrirons au chapitre 9.

CHAPITRE 7 –

ABSENCE DE L'ANOMALIE GEOCHIMIQUE AU NORD-EST DE SCHÖNBÜHL – PROLONGATION DE L'ANOMALIE SUR 4 KM AU NORD-EST DU TENNERA

7.1 INTRODUCTION

Les échantillons des sols des profils Go VIII à Go XIII n'ont été analysés que par le laboratoire A. Nous ne commenterons les résultats qu'en fonction de la situation sur le terrain et de la corrélation avec les anomalies P.S., sans faire de remarques sur la qualité des analyses. C'est pourquoi le mode de représentation sera différent de celui du chapitre précédent.

En revanche, nous avons vu que les échantillons des profils Go VI et Go VII avaient fait l'objet chacun de trois analyses pour Cu, Pb et Zn: dans ce chapitre, nous les situerons et en décrirons les résultats. Nous y reviendrons dans le chapitre suivant d'un point de vue, cette fois, comparatif.

Des profils Go VI à Go XIII, deux complètent la zone séparant Schönbühl du Wilerbach: ce sont, d'ouest en est, Go IX et Go VIII. Les six autres prolongent l'étude jusqu'au sud-est du Grundsee.

7.2 REGION SCHÖNBÜHL-WILERBACH: ABSENCE D'ANOMALIE

Entre les profils du Rotenberg (Go II) et du Wilerbach (Go III), il restait un vide de près de 4 km que nous avons comblé par deux profils. La zone anormale P.S. est en effet ininterrompue dans ce secteur mais reste très à l'écart de l'ancienne exploitation de Schönbühl. Elle se signale par plusieurs anomalies intenses parallèles qui se rapprochent vers le nord-est de l'anomalie décelée sur le filon. Nous savons que l'anomalie de -996 mV (Go IV) n'est due qu'au graphite, et la faible anomalie P.S. indiquée sur les six profils parallèles perpendiculaires à la minéralisation de Schönbühl (cf. figure 6) disparaît, elle, sitôt passés les anciens travaux miniers. Cela révélait-il un décalage du filon, une absence du graphite avec minéralisation ou une absence de graphite et de minéralisation? Les profils Go IX et Go VIII apportent des éléments de réponse à ces questions.

Le profil Go IX débute à 2'450 m et s'arrête à 2'667 m, en longeant une grosse crête qui fait face à l'ancienne exploitation de Schönbühl. Il existe bien quelques teneurs assez élevées pour les différents éléments, mais elles ne dépassent pas 370 ppm pour Zn, 350 ppm pour Pb, 180 ppm pour Cu et 2,5 ppm pour Ag. Ces valeurs n'ont jamais entre elles une bonne corrélation: une petite anomalie en Cu à 2'475 m, une autre en Zn entre 2'519 et 2'535 m et deux teneurs élevées en Pb à 2'545 m. Le molybdène reste très constant et n'excède pas 10 ppm.

On peut faire le même type de remarque pour les résultats du *profil Go VIII* qui suit, lui aussi, une crête 700 mètres à l'amont de Go IX et se termine à 2'507 m, au bord d'une cuvette comblée par de gros éboulis, précisément là où quelques valeurs plus élevées pour Pb et Zn apparaissent sur les trois derniers échantillons.

Il semble donc y avoir une interruption du filon dans cette zone, ce qui explique, peut-être, que les rapports miniers ne mentionnent pas de travaux de recherche entre Schönbühl et le Wilerbach.

7.3 ANOMALIES GEOCHIMIQUES A L'AMONT DU TENNERA

Le profil Go VI longe, sur 350 mètres, la rive droite du Tennera entre 2'250 et 2'418 m. Il est parallèle au profil P.S. no. 17 qui, des 28 longs profils, est le seul à n'avoir pas donné de réaction P.S.

Les résultats géochimiques sont très réguliers. Un seul échantillon, prélevé à 2'352 m, montre des valeurs anormales en Zn (310 ppm), en Cu (110 ppm) et en Mo (9 ppm), toutes trois à peine au-dessus du seuil d'anomalie. C'est pourtant là que nous avons retrouvé par la suite la galène en deux points, au pied de la crête qui supporte la Bietschhornhütte. La minéralisation, extrêmement mince, ne se marque que sur un échantillon de sol et l'on ne peut observer vers le bas d'augmentation sensible des teneurs, malgré une pente très raide et une roche subaffleurante.

Le profil Go VII emprunte le tracé du profil P.S. no 19 (cf. figure 8) sur la rive gauche du Nestalp, où, rappelons-le, nous avons décelé une très forte différence de potentiel de -990 mV vers 2'315 m. Celle-ci nous faisait penser, par son étroitesse et son amplitude, à un niveau graphiteux; par son altitude, elle correspondait cependant parfaitement à l'anomalie due aux sulfures du Wilerbach et du Tennera. C'est pourquoi nous avons établi un profil géochimique entre 2'180 et 2'400 m, recoupant cette anomalie. Ce profil suit la base des parois et traverse plusieurs cônes d'éboulis. Une large anomalie en Pb et Zn se dessine sur une distance de 80 mètres. Voici les résultats obtenus tous les dix mètres dans la zone d'anomalie:

Pb:	100	260	350	280	240	200	230	210	140	ppm
Zn:	310	410	840	860	620	460	430	420	370	ppm

L'effet de pente, bien visible sur la figure 19, se manifeste plus loin avec des teneurs encore élevées de ces éléments. En effet, pour Zn, 17 teneurs sur 34 dépassent 300 ppm, alors que le profil Go VI ne montre qu'une seule valeur anormale. Elles attestent la présence de la minéralisation, probablement sous forme de galène et de blende, car les résultats de Cu, de Ag et de Mo ne sont pas anormaux.

L'importance de ce profil est indéniable: non seulement l'anomalie géochimique coïncide parfaitement avec une anomalie P.S., mais elle permet de prolonger la minéralisation sur un tronçon de 1'200 mètres à partir de la rive gauche du Tennera.

Le profil suivant, Go XI, dont nous avons reporté les résultats pour les cinq éléments sur la figure 18, se trouve à 750 mètres, en ligne droite, de Go VII. Il suit une crête qui descend du petit Nesthorn. D'une longueur de 930 mètres pour une dénivellation de 335 mètres, ce profil révèle deux anomalies rapprochées entre 2'510 et 2'570 m (échantillons 36 à 52), qui s'étalent sur une distance de 210 mètres. La première se marque par un double pic pour Zn, Pb, Cu et Ag, alors que la seconde, qui coïncide avec une différence de potentiel de -520 mV en P.S., montre des teneurs encore plus élevées: le zinc atteint 1'310 ppm, le plomb 1'510 ppm et l'argent 4,5 ppm. Entre ces anomalies, donc de nouveau décalé, se manifeste un accroissement de la teneur en molybdène. Quant au cuivre, il suit bien l'ensemble de la zone anormale.

Signalons encore une petite anomalie en cuivre et en argent à 2'385 m (échantillon 21).

Ce profil dévoile donc deux niveaux minéralisés, d'un intérêt certain puisqu'ils se marquent par des anomalies de grande largeur et de forte amplitude.

Le profil Go XII (cf. figure 18) se situe au sud-est de Blatten, 1'400 mètres à l'amont de Go XI. Il débute à 2'204 m dans un couloir très raide, rejoint une grosse crête qu'il suit jusqu'à 2'624 m. La pente atteint par endroits jusqu'à 150 % (25 mètres de dénivellation pour une distance parcourue sur le terrain de 30 mètres).

Les résultats géochimiques sont assez surprenants; on y trouve, entre 2'350 et 2'390 m, les plus fortes teneurs en Ag des 495 analyses. Cette anomalie, qui se marque par deux pics, l'un de 6,5 et l'autre de 7 ppm, est confirmée par deux valeurs anormales de Mo, légèrement décalées vers le haut, et par une légère élévation des teneurs en Cu et Zn. La P.S. fait apparaître, à 2'390 m, une anomalie de -620 mV, dont l'argent et le molybdène ne sont très probablement pas la cause.

Une seconde anomalie se décèle entre 2'520 et 2'550 m, cette fois plus spécifique pour Pb et Zn, mais non observée en P.S.

Le dernier échantillon du profil, prélevé à 2'624 m, atteint 570 ppm pour Pb et 1'020 ppm pour Zn. Le cuivre (150 ppm) et l'argent (4,5 ppm) suivent également ces deux valeurs anormales, tandis que Mo et Cu montrent une petite anomalie 50 mètres plus bas (échantillon 5).

En résumé, ce profil nous révèle les points suivants:

- 1^o) L'anomalie de l'argent est unique de par son amplitude et de par l'absence de fortes teneurs en Pb. Elle se trouve à l'altitude à laquelle la galène affleure dans les autres vallons (Schönbühl, Wilerbach, Tennera), mais correspond aussi à la zone de graphite signalée sur les coupes de H. Ledermann (cf. figure 2).
- 2^o) Le plomb est l'élément, pour une fois, le plus constant; sa teneur moyenne est très proche de celle du cuivre. Ce n'est pas le cas sur les autres profils où il présente, en général, une plus forte concentration.
- 3^o) Les courbes du cuivre et du zinc sont d'un parallélisme presque parfait.
- 4^o) Les teneurs moyennes de tous les éléments, sauf le molybdène, sont très élevées. Est-ce là de nouveau l'effet de la pente? Avons-nous affaire plutôt à une région riche en sulfures disséminés? En tout cas, les teneurs en zinc et même en argent, que la pente ne semble pas affecter ailleurs, restent élevées du début à la fin du profil.
- 5^o) Le profil Go XII prolonge l'anomalie jusqu'à la hauteur de Eisten, soit à près de 4 km, à vol d'oiseau, du Wilerbach.

Le profil Go X, au sud-est de Chiemad, comporte un seul échantillon anomal en Zn, Cu et Ag à 2'355 m, et d'assez hautes teneurs en Zn, Cu et Mo vers 2'450 m. On constate une élévation générale des teneurs dès 2'370 m.

Analyses géochimiques Echantillons de sol

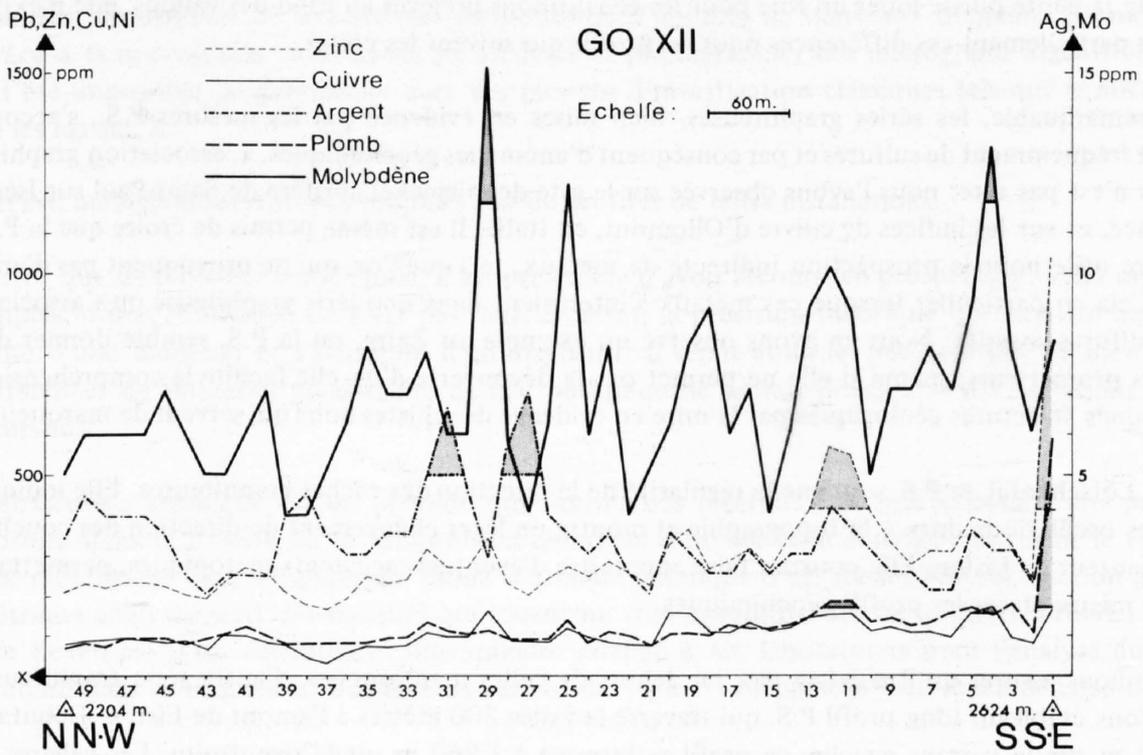
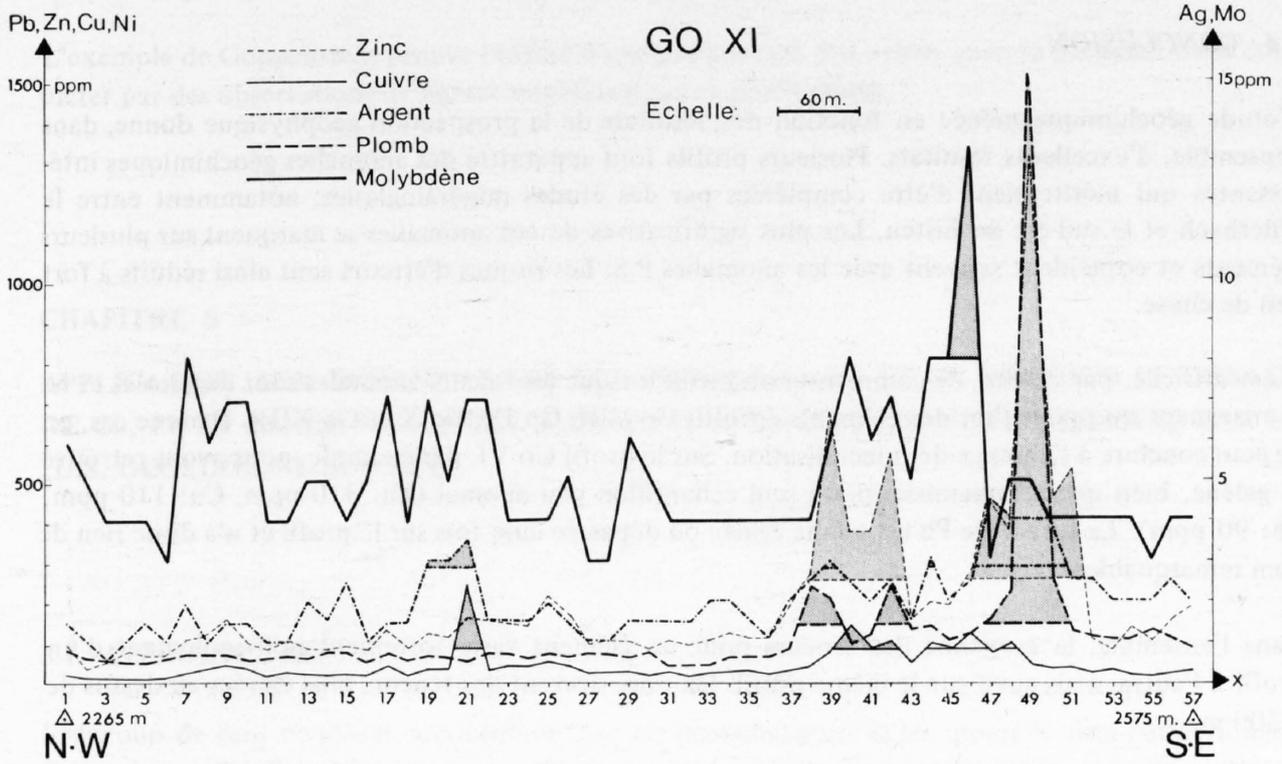


Figure 18

Quant au dernier *profil*, *Go XIII*, situé au SSE du Grundsee, il révèle quelques valeurs anormales éparses entre 2'200 et 2'250 m, alors que l'anomalie P.S. se marque vers 2'330 m.

7.4 CONCLUSION

L'étude géochimique menée en fonction des résultats de la prospection géophysique donne, dans l'ensemble, d'excellents résultats. Plusieurs profils font apparaître des anomalies géochimiques intéressantes qui mériteraient d'être complétées par des études minéralogiques, notamment entre le Wilerbach et le sud-est de Eisten. Les plus significatives de ces anomalies se marquent sur plusieurs éléments et coïncident souvent avec les anomalies P.S. Les risques d'erreurs sont ainsi réduits à fort peu de chose.

Il est difficile, par contre, de commenter un profil lorsque les valeurs anormales sont dispersées et ne se marquent que pour l'un des éléments (profils *Go VIII*, *Go IX*, *Go X* et *Go XIII*). Dans ce cas, on ne peut conclure à l'absence de minéralisation. Sur le profil *Go VI*, par exemple, nous avons retrouvé la galène, bien que n'apparaisse qu'un seul échantillon peu anormal (Zn: 310 ppm, Cu: 110 ppm, Pb: 90 ppm). La teneur de Pb est même égale ou dépassée cinq fois sur le profil et n'a donc rien de bien remarquable.

Dans l'ensemble, la moyenne des teneurs pour un élément varie fortement non seulement d'un profil à l'autre, mais aussi sur le même profil. On note souvent des teneurs plus élevées au-dessus de 2'300 m.

Bien que la pente puisse jouer un rôle pour les échantillons prélevés au fond des vallons, elle n'explique que partiellement ces différences pour les profils qui suivent les crêtes.

Chose remarquable, les séries graphiteuses, bien mises en évidence par les mesures P.S., s'accompagnent fréquemment de sulfures et par conséquent d'anomalies géochimiques. L'association graphite-sulfures n'est pas rare: nous l'avons observée sur le gîte de mispickel aurifère de Saint-Paul sur Isère, en France, et sur les indices de cuivre d'Ollomont, en Italie. Il est même permis de croire que la P.S. peut être utile pour la prospection indirecte de métaux, tels que l'or, qui ne provoquent pas d'anomalie. Cela en particulier lorsque ces métaux s'intercalent dans une série graphiteuse ou s'associent à des sulfures massifs. Nous en avons observé un exemple au Zaïre, où la P.S. semble donner des résultats prometteurs; même si elle ne permet pas la découverte d'or, elle facilite la compréhension de certaines structures géologiques par la mise en évidence de schistes noirs qui servent de marqueurs.

Dans le Lötschental, la P.S. souligne la régularité de la direction des roches graphiteuses. Elle indique certaines oscillations dues à la topographie et montre un léger changement de direction des couches dès la hauteur de Eisten. Elle pourrait faire apparaître d'éventuels accidents tectoniques, permettant ainsi de mieux placer les profils géochimiques.

Afin de nous assurer qu'il n'existe pas, en dehors de celles mentionnées, d'autre série graphiteuse, nous avons établi un long profil P.S. qui traverse la vallée 300 mètres à l'amont de Eisten. Débutant à 2'600 m sur le versant gauche, ce profil se termine à 1'860 m sur la rive droite. Les valeurs ne décèlent aucune nouvelle anomalie: l'imprégnation de graphite est donc bien limitée dans l'espace, englobant la minéralisation ou lui restant parallèle.

Si la géochimie permet d'affirmer que les indices métallifères se prolongent à l'amont de la vallée jusqu'à la hauteur de Eisten, il ne faut pas en conclure nécessairement que cette zone présente un intérêt économique.

L'exemple de Goppenstein prouve l'utilité d'une prospection P.S., mais aussi la nécessité de la compléter par des observations de nature minéralogique et géochimique.

CHAPITRE 8 –

APPLICATION AUX ECHANTILLONS DES PROFILS Go VI ET Go VII, POUR LE DOSAGE DE Cu, Pb ET Zn, DE METHODES D'ANALYSE SEMI-QUANTITATIVE UTILISEES PAR LE „U.S. GEOLOGICAL SURVEY”

8.1 INTRODUCTION

Beaucoup de gens ne jurent, aujourd'hui, que par les ordinateurs et les appareils ultra-perfectionnés. Certes, leur utilisation s'avère indispensable lorsqu'il s'agit notamment de traiter un grand nombre de données, de disposer de très grandes mémoires ou d'aborder de nouveaux domaines de recherche. Grâce à la microsonde, nous avons pu analyser et photographier des micrograins argentifères qu'il eût été impossible de déterminer avec des moyens d'investigation classiques tels que le microscope ou les rayons X.

Il n'est, malheureusement, pas toujours aisé de profiter de telles installations.

Plutôt que de renoncer à une étude, il est préférable d'avoir recours, en prospection, à des méthodes simples et peu coûteuses. Ce n'est pas tant, en effet, la précision théorique qui importe que la fiabilité d'une méthode et l'efficacité d'un dispositif: il serait absurde, par exemple, de mesurer des différences de potentiel au dixième de mV puisqu'on ne saurait interpréter des variations de plusieurs mV.

L'absorption atomique est un procédé qui fournit des résultats très précis, mais d'une précision illusoire dans la mesure où la composition chimique d'un sol varie constamment dans le temps et très rapidement dans l'espace. Le mode d'attaque chimique d'un échantillon, la fraction granulométrique analysée sont des facteurs qui jouent un rôle primordial sur les résultats. SIEGEL (1974) cite l'exemple d'un échantillon alluvionnaire envoyé à six laboratoires pour l'analyse du nickel contenu dans la magnétite. Les teneurs varient de 14 à 1'120 ppm; la différence dépasse 8'000 %.

Entre les deux laboratoires A et B, auxquels nous avons envoyé nos échantillons, nous avons constaté qu'il existait, pour le même élément, soit un écart systématique différant d'un profil à l'autre, soit, dans un même profil, un écart variable pouvant s'inverser entre les basses et les hautes teneurs.

Fort heureusement, ce sont les anomalies, les contrastes de teneurs qui nous intéressent, davantage que la valeur absolue et la précision, au ppm près, du résultat.

Cette remarque s'applique aussi aux mesures de P.S.

Dès lors, si l'analyse chimique semi-quantitative fait apparaître les mêmes zones anormales que l'analyse par absorption atomique, nous pouvons nous contenter de la première méthode et nous fier à ses résultats. Peu importe que les valeurs obtenues soient entachées d'une certaine imprécision.

Pour le démontrer, nous avons tenté l'expérience suivante: analyser les 59 échantillons de sols des profils géochimiques Go VI et Go VII pour le cuivre, le plomb et le zinc en suivant les méthodes décrites dans le „Geological Survey Bulletin 1152”, paru en 1963, sous le titre „Analytical Methods Used in Geochemical Exploration by the U.S. Geological Survey”, puis comparer nos résultats avec ceux obtenus pour les mêmes sols par les laboratoires A et B.

8.2 PREPARATION DES ECHANTILLONS

Après avoir séché les sols, nous les avons tamisés à une fraction inférieure à 0,5 mm. Pour les séparer en trois parts, nous avons conçu un petit appareil répartissant celles-ci dans trois enveloppes destinées aux laboratoires A, B et C. Pour vérifier la qualité du mode de séparation, nous avons fait analyser par le même laboratoire les trois fractions de six échantillons en attribuant à celles-ci des numéros quelconques.

Les résultats du tableau 5 (en ppm; laboratoire A) montrent que chaque part est bien représentative du tout et nous autorisent à comparer respectivement les trois séries d'analyses de Cu, Pb et Zn; les écarts ne risquent guère d'être dus au mode de séparation.

Les échantillons réservés aux analyses semi-quantitatives ont été retamisés à une fraction de 0,1 mm (100 μ m), avant d'être dissous de la manière suivant: on ajoute à 0,1 g du sol à analyser 0,5 g de pyrosulfate ($K_2S_2O_7$). Ce mélange est chauffé pendant deux minutes jusqu'à sa fusion. Un mouvement de rotation amène un mince film à se déposer à l'intérieur du tube. Après addition de 3 ml de HCl 6M, l'éprouvette est plongée dans un bain-marie jusqu'à dissolution du film. On dilue à 10 ml avec de l'eau désionisée (metal free water); on prélève alors 2 ml par analyse. A ce stade, selon les auteurs de la publication susmentionnée, la dissolution de Cu, Pb et Zn est presque totale.

8.3 MATERIEL DE BASE ET PRODUITS CHIMIQUES

Le Bulletin 1152 mentionné * fournit la liste, pour chacun des 24 éléments que l'on peut analyser, du matériel indispensable. Pour Cu, Pb et Zn, ce matériel consiste essentiellement en tubes à essais avec bouchon (plusieurs centaines), en cylindres gradués, en entonnoirs de séparation (125 à 2'000 ml) avec support, en pipettes graduées (0,1 à 50 ml); à cela s'ajoutent des bouteilles de stockage et du petit matériel tel que papiers-filtres, papier pH, spatules, propipettes, etc.

* Note: signalons une erreur de concentration dans la préparation de solution de dithizone: lire, page 20, 0,05 g au lieu de 0,005 g.

Tableau 5

Echantillon	Cu	Pb	Zn	Ag	Mo
1	10	40	60	2	3
1'	10	40	50	2,5	2
1''	5	50	40	3	3
2	30	100	170	1,5	5
2'	25	100	140	2	4
2''	25	90	140	1,5	4
3	35	70	150	1,5	4
3'	35	70	130	1,5	6
3''	40	80	140	2	4
4	30	110	160	1	4
4'	30	110	150	1	5
4''	35	120	160	1	6
5	100	120	400	3	5
5'	110	120	400	4	6
5''	105	120	450	3,5	7
6	85	90	200	7	4
6'	85	80	200	6	8
6''	90	80	210	6,5	6

Il est important d'avoir à disposition une balance très précise (± 1 mg), un petit réfrigérateur où l'on peut garder les solutions de dithizone (diphénylthiocarbazone) à l'abri de la lumière et de la chaleur, un système de désionisation de l'eau et une cuve d'évacuation des produits toxiques.

Si la plupart des produits s'obtiennent facilement, tous doivent être d'une grande pureté et porter la spécification „pro analysi”. Malgré cela, il faudra éliminer les métaux lourds des solutions standards.

Certains produits sont très toxiques; un géologue ne peut les obtenir qu'avec une autorisation du Département de l'Intérieur et de la Santé publique, section des toxiques. Il s'agit avant tout du tétrachlorure de carbone (CCl_4), qu'il ne faudra pas respirer, et du cyanure de potassium (KCN), qui nécessite l'emploi de propipettes.

8.4 PRINCIPE DES METHODES SEMI-QUANTITATIVES UTILISEES

Une fois l'échantillon dissous, l'élément recherché est extrait d'une solution aqueuse dans un solvant non miscible; la réaction ainsi produite donne au solvant une coloration dont l'intensité ou les diverses teintes varient selon la quantité de l'élément présent.

Cette coloration est comparée à celles de standards, préparés au préalable, dont on connaît la teneur en métal cherché.

La dithizone dissoute dans CCl_4 est employée pour la recherche du zinc, dont les cinq standards donnent une gamme de couleurs allant du gris-bleu au rouge.

La détermination du plomb se fait également avec une solution de dithizone, en présence de KCN; celui-ci forme un complexe avec Cu et Zn, les empêchant de réagir en même temps que Pb, dont les quatre standards donnent une gamme monochromatique de roses.

Quant au cuivre, il réagit avec une solution de 2,2'-biquinoline et d'alcool isoamylique. Les sept standards vont du violet pâle au violet foncé; la coloration s'intensifie avec l'augmentation de la teneur en Cu.

8.5 REMARQUES SUR LES STANDARDS

La préparation des standards est délicate: c'est à eux, en effet, que l'on compare toutes les analyses; ils interviennent dans la formule suivante, qui permet le calcul de la teneur en ppm:

$$\text{ppm} = \frac{\text{volume de la solution de l'échantillon (ml)}}{\text{poids de l'éch. pris pour l'analyse (g)}} \times$$
$$\times \frac{\text{microgrammes de l'élément utilisé pour former le standard } (\mu\text{g})}{\text{quantité de la solution de l'éch. prise pour l'analyse (ml)}}$$

La quantité de l'élément présent dans la préparation des standards est infime: 1 à 4 μg dans ceux de Pb et Zn, 0,2 à 6 μg dans ceux de Cu. Pour éviter des erreurs, il faut donc des instruments très précis et des produits ne contenant aucune trace de ces métaux.

Pour nos 177 analyses, nous avons toujours pris 0,1 g de sol pour un volume de 10 ml de la solution de l'échantillon: le premier rapport de la formule est donc une constante valant 100.

Le second rapport varie, lui, en fonction de la coloration trouvée et de la quantité de la solution de l'échantillon, qui est, en principe, de 2 ml.

Avec ces valeurs, les standards du cuivre vont de 0 ($\frac{10}{0,1} \times \frac{0}{2}$) à 300 ppm ($\frac{10}{0,1} \times \frac{6}{2}$). Les résultats de nos 59 analyses ont tous été compris entre ces deux extrêmes.

Pour Pb et Zn, la gamme des standards est plus limitée: quatre pour Pb (0 à 150 ppm) et cinq pour Zn (0 à 200 ppm). Mais, en moyenne, la teneur de ces éléments dans les sols est plus élevée que celle

du cuivre. Sur une anomalie, elle peut s'élever jusqu'à plus de 1'000 ppm. Si l'on désire atteindre cette valeur, il faut procéder par dilutions successives en diminuant par étapes la quantité de solution à analyser; on en prend d'abord 2 ml. On obtient les standards suivants:

standards:	0 μg :	0 ppm	
	1 μg :	50 ppm	
	2 μg :	100 ppm	classes de 50 ppm
	3 μg :	150 ppm	
	4 μg :	200 ppm	

La coloration dépasse le standard 4 μg ; il faut donc réduire à 1 ml la quantité de la solution. Les standards deviennent:

standards:	0 μg :	0 ppm	
	1 μg :	100 ppm	
	2 μg :	200 ppm	classes de 100 ppm
	3 μg :	300 ppm	
	4 μg :	400 ppm	

Notre coloration est encore plus élevée que le standard 4 μg ; il y a dans ce cas deux possibilités:

1^o) On diminue encore de moitié (0,5 ml) la quantité de la solution à analyser:

standards:	0 μg :	0 ppm	
	1 μg :	200 ppm	
	2 μg :	400 ppm	classes de 200 ppm
	3 μg :	600 ppm	
	4 μg :	800 ppm	

La coloration reste plus élevée que le standard 4 μg . On prend alors, par exemple, 0,2 ml:

standards:	0 μg :	0 ppm	
	1 μg :	500 ppm	
	2 μg :	1'000 ppm	classes de 500 ppm
	3 μg :	1'500 ppm	
	4 μg :	2'000 ppm	

Cette fois, la coloration entre dans la gamme des standards.

Plus petite est la quantité de solution à analyser, plus grandes sont les classes et plus importantes risquent d'être les erreurs. De fait, la comparaison entre nos résultats et ceux qui ont été obtenus par absorption atomique montre que la méthode semi-quantitative entraîne une surestimation des teneurs dépassant 300 ou 400 ppm.

2^o) On renonce à diluer davantage et on considère de telles teneurs comme anormales, sans leur attribuer une valeur précise.

Fréquemment, les colorations obtenues sont proches mais non identiques à celles d'un standard. Si l'on désire, dans les basses et moyennes teneurs, avoir des résultats précis, il est possible d'ajouter un signe + ou - signifiant: très légèrement supérieur ou inférieur à tel standard. On limite ainsi la marge d'incertitude entourant chaque analyse.

Il est possible aussi d'augmenter le nombre des standards. Cela joue très bien pour le cuivre; c'est, en revanche, plus délicat pour le plomb et le zinc. En effet, la dithizone a pour inconvénient de s'oxyder à la lumière et à la chaleur. Aussi, les standards de Pb doivent-ils être refaits deux fois par jour, ceux de Zn tous les deux jours; par contre, les standards de Cu restent stables plusieurs mois.

8.6 COMPARAISON DE NOS RESULTATS (LABORATOIRE C) AVEC CEUX DES LABORATOIRES A ET B

La figure 19 représente les distributions du cuivre, du plomb et du zinc des 34 échantillons de sols du profil Go VII, analysés par les trois laboratoires A, B (absorption atomique) et C (méthode colorimétrique semi-quantitative). Puisqu'il s'agit, pour nos analyses, de classes plus ou moins grandes de teneurs, chaque point reporté correspond à la valeur centrale de la classe, sauf pour les teneurs élevées (flèches) où l'on a noté la valeur inférieure.

Le cuivre:

Tous nos résultats sont compris entre 40 et 90 ppm. Il ne ressort pas d'anomalie du cuivre, pas plus que dans les résultats des laboratoires A et B, dont les deux distributions, malgré un écart, sont remarquablement parallèles. Les teneurs du laboratoire B sont les plus élevées, comprises entre 57 et 110 ppm; celles de A, plus proches des nôtres, varient entre 35 et 80 ppm.

Néanmoins, les trois courbes sont très semblables et même les petites fluctuations se marquent aux mêmes endroits; en analyse semi-quantitative, elles sont plus atténuées. Nos résultats sont donc excellents.

Le plomb:

Si les valeurs du bruit de fond sont plus basses pour les analyses semi-quantitatives — le seuil d'anomalie est au-dessous des autres —, la zone anormale s'étalant entre les échantillons 4 et 23 apparaît très bien sur les trois distributions. On remarque que les teneurs des échantillons 12 et 16 sont trop élevées, mais que l'anomalie entre les prélèvements 5 et 9 concorde parfaitement avec les analyses par absorption atomique.

Les valeurs du background sont plus faibles pour B que pour A, alors que c'est l'inverse dans la zone anormale.

On peut dire que, là aussi, nos résultats sont très bons.

Le zinc:

De trois éléments, le zinc est le plus délicat à analyser.

Essais géochimiques • Echantillons de sol

Analyses: - - - - - lab. A - · - · - lab. B ——— lab. C

Echelle : 

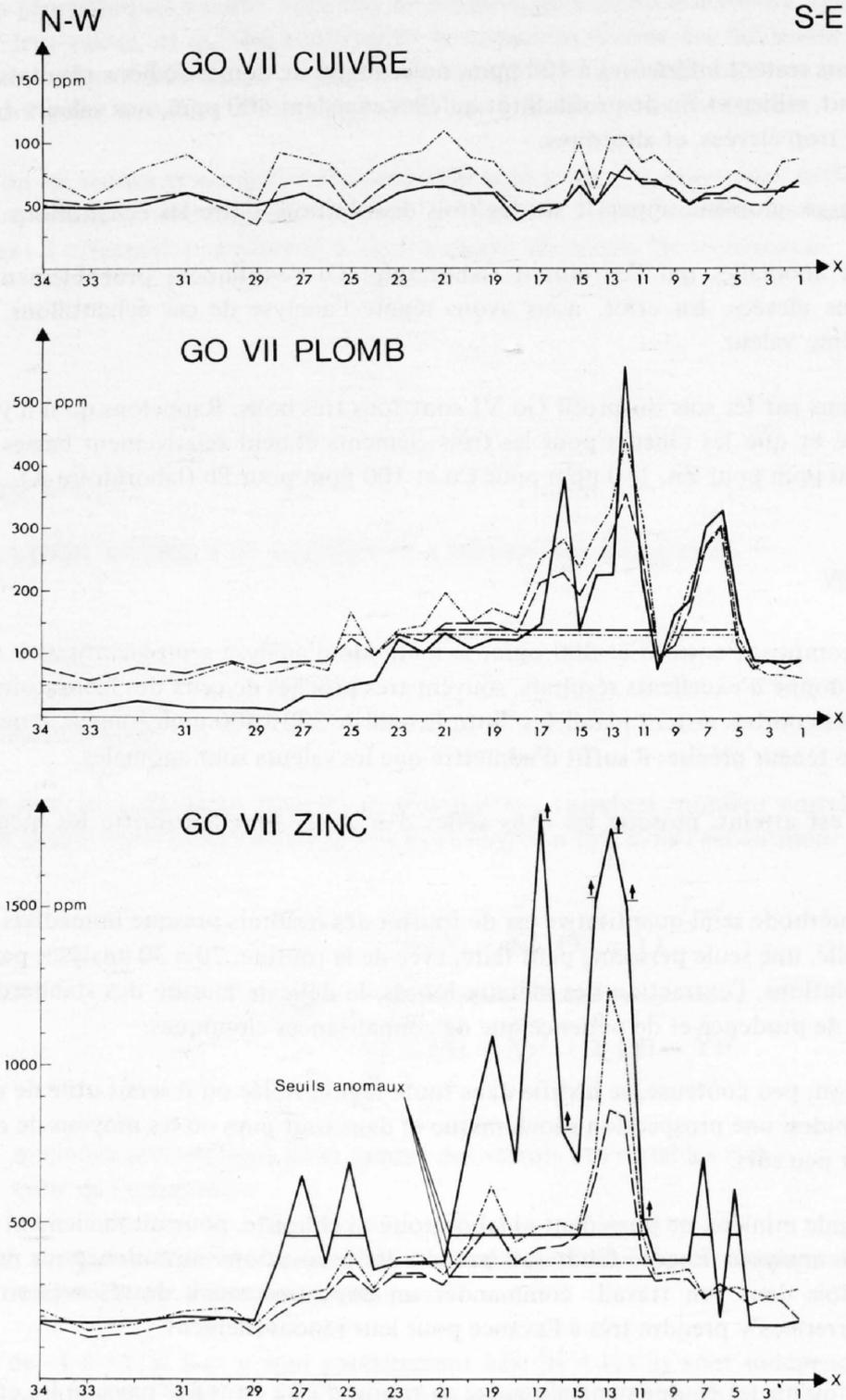


Figure 19

D'une part, les colorations des standards sont difficiles à stabiliser, les teintes variant légèrement d'une préparation à l'autre. D'autre part, la teneur moyenne en Zn est plus du double de celle en Pb (\bar{x} Pb = 147 ppm, \bar{x} Zn = 336 ppm, laboratoire A). 27 analyses sur 34 (laboratoire A) dépassent 200 ppm, valeur du plus haut standard si l'on prend, au départ, 2 ml de la solution de l'échantillon pour l'analyse.

Tant que les teneurs restent inférieures à 400 ppm, notre méthode donne de bons résultats: on peut le constater en début, milieu et fin de profil. Sitôt qu'elles excèdent 400 ppm, nos valeurs deviennent systématiquement trop élevées, et aléatoires.

Cependant, une large anomalie apparaît sur les trois distributions entre les échantillons 11 et 21.

Les deux doubles anomalies qui l'entourent (laboratoire C) s'expliquent probablement par des concentrations plus élevées. En effet, nous avons répété l'analyse de ces échantillons, trouvant chaque fois la même valeur.

Les résultats obtenus sur les sols du profil Go VI sont tous très bons. Rappelons qu'il n'y avait pas d'anomalie notable et que les teneurs pour les trois éléments étaient relativement basses. Elles ne dépassaient pas 310 ppm pour Zn, 110 ppm pour Cu et 100 ppm pour Pb (laboratoire A).

8.7 CONCLUSION

Pour les teneurs comprises entre 0 et 300 ppm, la méthode d'analyse semi-quantitative appliquée aux trois éléments donne d'excellents résultats, souvent très proches de ceux des laboratoires A et B; s'ils s'en écartent, les courbes restent parallèles. Sitôt le seuil de 300 à 400 ppm franchi, il ne faut plus vouloir chercher de teneur précise; il suffit d'admettre que les valeurs sont anormales.

Le but recherché est atteint, puisque les trois séries d'analyses font apparaître les mêmes zones anormales.

L'avantage d'une méthode semi-quantitative est de fournir des résultats presque immédiats. Une fois le laboratoire installé, une seule personne peut faire, avec de la routine, 20 à 30 analyses par jour. La préparation des solutions, l'extraction des métaux lourds, la délicate mesure des standards exigent davantage de soin, de prudence et de patience que de connaissances chimiques.

Une telle installation, peu coûteuse, se justifie dans toute région isolée où il serait utile de contrôler, par des analyses rapides, une prospection géochimique et dans tout pays où les moyens de communication sont lents et peu sûrs.

Une petite compagnie minière, ne possédant ni laboratoire ni chimiste, pourrait facilement s'équiper pour de semblables analyses. Encore faudrait-il prendre les précautions suivantes, pour ne pas être arrêté plusieurs mois dans son travail: commander un important stock de réserves en produits chimiques et en verrerie; s'y prendre très à l'avance pour leur renouvellement.

Il est bien évident qu'un tel équipement n'a guère sa raison d'être dans nos pays où les envois sont rapides et sûrs; il se justifierait éventuellement dans le cadre d'un enseignement pratique de la géochimie, où les étudiants désirent obtenir les résultats immédiatement.

Dans nos régions, le délai entre l'envoi et la réception des résultats a varié, pour nous, de 3 à 8 semaines et le coût d'une analyse quantitative pour cinq éléments est d'environ 10 francs suisses pour un laboratoire dont c'est la spécialité.

Nos essais géochimiques avaient pour but de montrer qu'aujourd'hui encore, ces méthodes simples ont toute leur valeur, et qu'elles soutiennent la comparaison avec des méthodes d'analyse très perfectionnées; celles-ci demandent de gros investissements en installations et un personnel spécialisé. Elles ne sont guère rentables si elles ne peuvent être utilisées à plein rendement.

De plus, on ne saurait trop répéter l'intérêt qu'il peut y avoir à suivre jour après jour les résultats d'une prospection géochimique préliminaire de façon à pouvoir guider, à chaque pas, le type de prélèvement à effectuer et à pouvoir à tout moment réorienter les recherches.

CHAPITRE 9 –

CORRELATION ENTRE LES ELEMENTS CHIMIQUES ANALYSES

9.1 INTRODUCTION

Le coefficient de corrélation linéaire de Pearson r_{xy} (product moment correlation coefficient), exprime la liaison entre deux variables, x et y, observées n fois dans l'échantillon. Il vaut:

$$r_{xy} = \frac{\sum_1^n (X_i - \bar{X}) (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_1^n (X_i - \bar{X})^2 \cdot \sum_1^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

\bar{X}, \bar{Y} : moyenne arithmétique de la somme des valeurs des variables x et y
 n : taille de l'échantillon

Pour nous, ces variables seront les résultats des analyses géochimiques; chaque valeur de r exprimera la corrélation par couple d'éléments chimiques.

r_{xy} varie de -1 à +1; si x et y sont parfaitement liés, $|r| = 1$; s'ils sont indépendants, $r = 0$. La réciproque n'est pas vraie, sauf si x et y obéissent à une distribution normale. C'est le cas, rappelons-le, de toutes les distributions des éléments analysés sur les valeurs brutes ou, plus souvent, sur le logarithme de celles-ci.

Pour l'interprétation de r , FISHER et YATES (1953) ont établi un tableau des valeurs du coefficient de corrélation pour différents seuils de signification, en fonction du nombre de degrés de liberté (d.d.l. = $n-2$). Pour un seuil donné, r diminue avec l'augmentation de la taille de l'échantillon.

Si celle-ci dépasse 100, on utilisera l'expression:

$$t = \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \sqrt{n-2}$$

La table des valeurs de t permet alors de voir si la corrélation existe et, si oui, à quel seuil de signification.

Le but du test est de déterminer si les coefficients de corrélation peuvent être considérés comme significativement différents de zéro. Si tel est le cas, on dit qu'il existe une liaison statistique entre les deux variables envisagées. Si r_{XY} tend vers 1, cette liaison peut être considérée comme toujours plus forte.

Remarques:

- 1^o) S'il est permis de dire que la corrélation d'un couple est meilleure ou moins bonne que celle d'un autre couple, il est difficile de juger, en valeur absolue, de la qualité de cette corrélation.
- 2^o) Si celle-ci existe, elle n'implique pas une relation de cause à effet.

9.2 RESULTATS

Le calcul du coefficient r et le graphique des points ont été établis pour toutes les paires d'éléments chimiques, *profil par profil*.

La liaison est généralement significative (le plus souvent au seuil de 1 ‰) pour les couples suivants: Zn-Pb, Cu-Pb et Cu-Zn. Elle l'est le plus fréquemment pour Zn-Pb.

Les liaisons Ag-Pb, Ag-Zn et Ag-Cu sont moins bonnes et n'existent qu'irrégulièrement. Quant au molybdène, il semble ne se lier que localement aux autres éléments. Sa corrélation est plus fréquente et meilleure avec Cu qu'avec Pb, Zn et surtout Ag.

Le tableau 6 montre que, *sur l'ensemble des données* toutes les corrélations sont significatives au seuil de 1 ‰, sauf pour la paire Mo-Pb (1 %).

Pour $n = 484$, l'ordre décroissant de ces liaisons est le suivant: Cu-Zn > Pb-Zn > Ag-Cu > Ag-Zn > Cu-Pb > Ag-Pb. Ag paraît donc mieux lié à Cu et Zn qu'à Pb.

Le molybdène ($n = 373$), lui, se lie statistiquement mieux à Cu qu'à Zn, Ag et surtout Pb.

On constate donc de légères différences entre les liaisons calculées profil par profil et celles qui le sont sur l'ensemble des données.

Tableau 6 Corrélation par couple d'éléments sur l'ensemble des données géochimiques

	r_{xy}	d.d. 1 (n-2)	d (seuil de signification)
Cu-Zn	0,74	482	1 ‰
Zn-Pb	0,72	482	1 ‰
Ag-Cu	0,54	482	1 ‰
Ag-Zn	0,52	482	1 ‰
Cu-Pb	0,45	482	1 ‰
Ag-Pb	0,37	482	1 ‰
Mo-Cu	0,48	371	1 ‰
Mo-Zn	0,36	371	1 ‰
Mo-Ag	0,31	371	1 ‰
Mo-Pb	0,16	371	1 %

La figure 20 représente graphiquement deux distributions de couples d'éléments, dont la première, Pb-Zn, est beaucoup plus forte que la seconde, Mo-Pb. Les deux liaisons sont cependant statistiquement significatives, respectivement aux seuils de 1 ‰ et de 1 %.

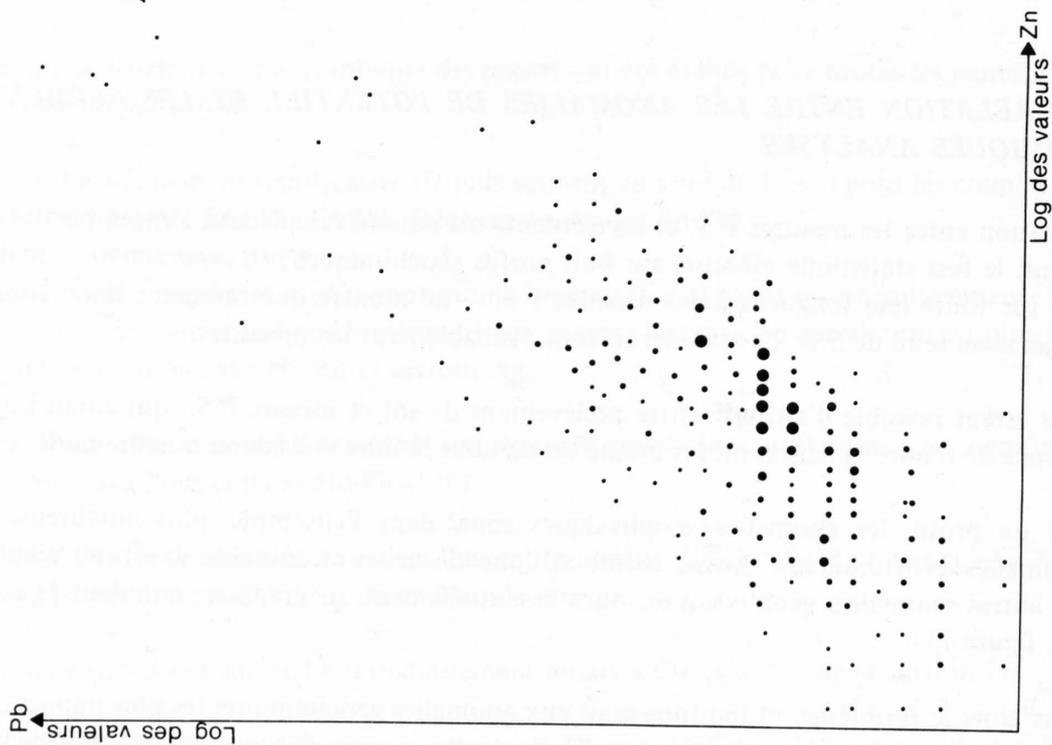
9.3 CORRELATION ENTRE LES ANOMALIES DE POTENTIEL ET LES ELEMENTS CHIMIQUES ANALYSES

La corrélation entre les mesures P.S. et les éléments n'a pas été calculée sur l'ensemble des données. Cependant, le test statistique effectué sur huit profils géochimiques *pris séparément* – mais correspondant sur toute leur longueur à des mesures P.S. – ne montre que rarement une liaison significative, même au seuil de 5 %. Les raisons en sont probablement les suivantes:

- 1^o) Une erreur possible d'altitude entre prélèvement de sol et mesure P.S., qui aurait pour conséquence de rendre la liaison moins bonne ou de nous la faire considérer comme nulle.
- 2^o) Sur un profil, les anomalies géophysiques sont, dans l'ensemble, plus nombreuses que les anomalies géochimiques. Aussi, même si l'une de celles-ci coïncide avec une réaction P.S., les autres anomalies géophysiques, dues essentiellement au graphite, annulent la corrélation (cf. figure 21).

Inversons alors le problème, et limitons-nous aux anomalies géochimiques les plus importantes, sans tenir compte de valeurs anormales éparses. Dans quelle mesure s'accompagnent-elles de chutes de potentiel? On constate que:

Relation entre les teneurs Pb et Zn
 Taille de l'échantillon (n):484 $r_{xy}=0.72$



Relation entre les teneurs Pb et Mo
 Taille de l'échantillon (n):373 $r_{xy}=0.16$

Nombre de superpositions:

- 1
- 2 à 5
- 6 à 9
- Plus de 9

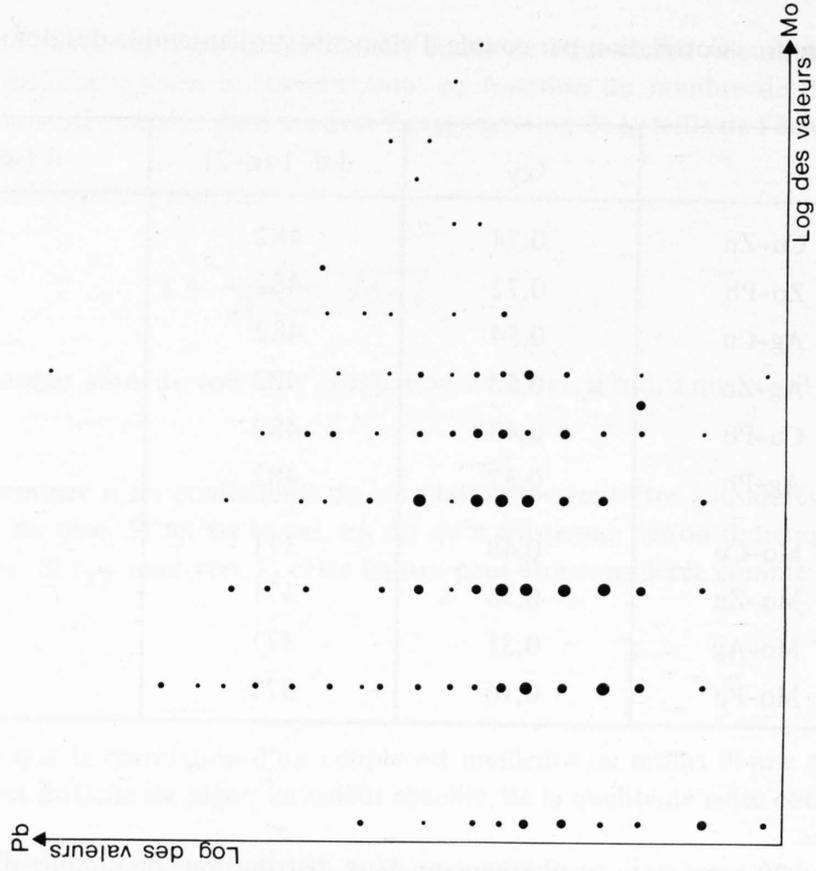


Figure 20

Exemple de corrélation entre mesures PS et géochimie. GO VII

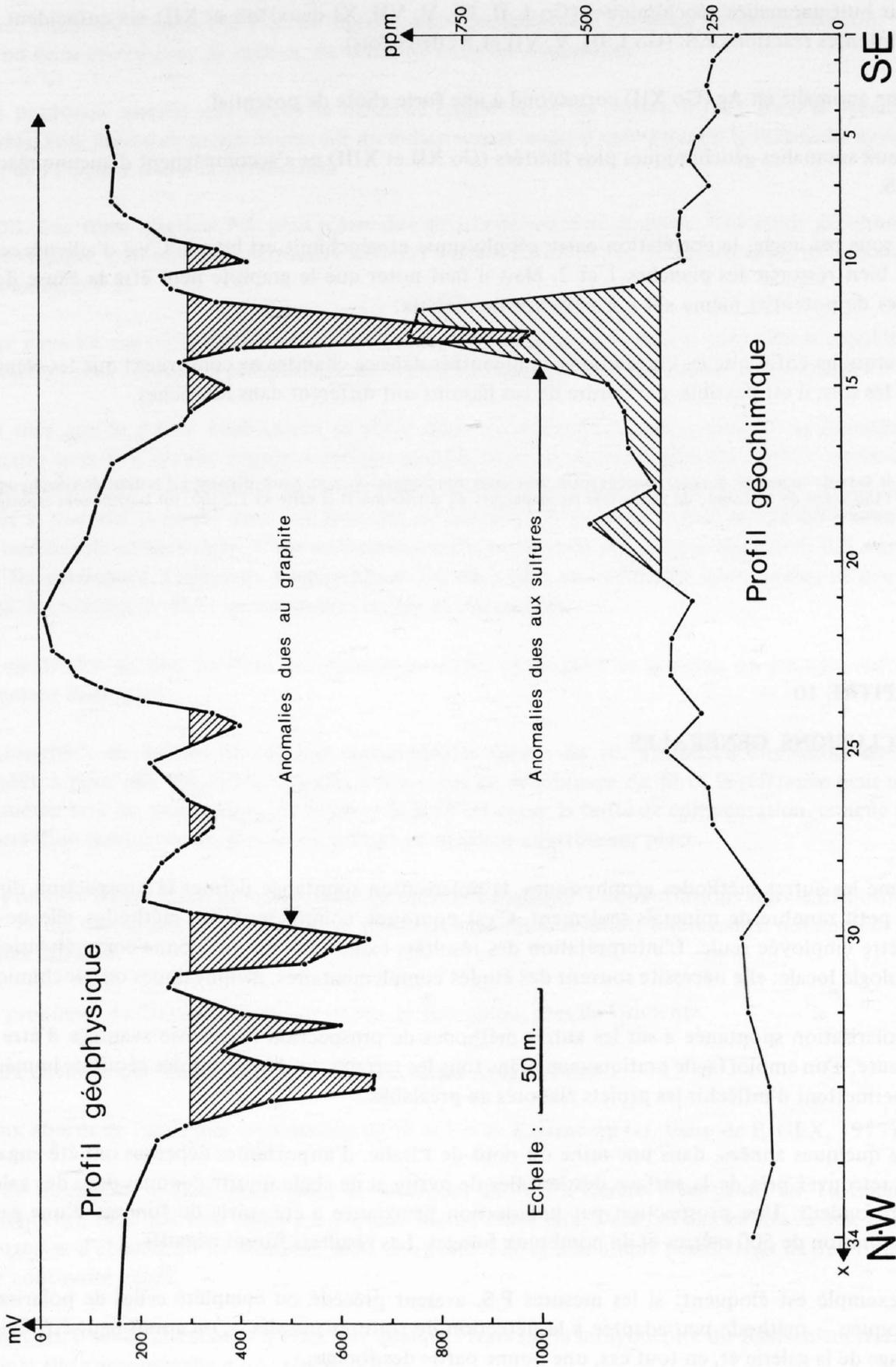


Figure 21

- Sur huit anomalies géochimiques (Go I, II, III, V, VII, XI deux fois et XII), six coïncident avec d'intenses réactions P.S. (Go I, III, V, VII et XI deux fois).
- Une anomalie en Ag (Go XII) correspond à une forte chute de potentiel.
- Deux anomalies géochimiques plus limitées (Go XII et XIII) ne s'accompagnent d'aucune réaction P.S.

Vue sous cet angle, la corrélation entre géophysique et géochimie est bonne. C'est d'ailleurs ce que font bien ressortir les planches 1 et 2. Mais il faut noter que le graphite peut être la cause de ces chutes de potentiel même s'il y a présence de métaux.

Remarquons enfin que les corrélations commentées dans ce chapitre ne concernent que les éléments dans les sols; il est possible que l'ordre de ces liaisons soit différent dans les roches.

Note: la liste de toutes les données géochimiques, avec leurs coordonnées x, y et z, est déposée à l'Institut de Géophysique de l'Université de Lausanne, de même que les graphiques de corrélation et la carte au 1:2'500, sur laquelle sont reportées les mesures P.S.

CHAPITRE 10 –

CONCLUSIONS GENERALES

Comme les autres méthodes géophysiques, la polarisation spontanée permet la prospection directe d'un petit nombre de minerais seulement. C'est pourquoi, comme les autres méthodes, elle ne saurait être employée seule. L'interprétation des résultats exige toujours une bonne compréhension de la géologie locale; elle nécessite souvent des études complémentaires, géophysiques ou géochimiques.

La polarisation spontanée a sur les autres méthodes de prospection l'immense avantage d'être peu coûteuse, d'un emploi facile pratiquement dans tous les terrains, et de fournir des résultats immédiats qui permettent d'infléchir les projets élaborés au préalable.

Il y a quelques années, dans une mine du nord de l'Italie, d'importantes dépenses ont été engagées pour retrouver près de la surface des lentilles de pyrite et de chalcopryrite connues dans des galeries en profondeur. Une prospection par polarisation provoquée a été suivie du fonçage d'une galerie d'exploration de 500 mètres et de nombreux forages. Les résultats furent négatifs.

Cet exemple est éloquent: si les mesures P.S. avaient précédé ou complété celles de polarisation provoquée – méthode peu adaptée à la détection de sulfures massifs –, on aurait peut-être évité le fonçage de la galerie et, en tout cas, une bonne partie des forages.

Certes, l'absence d'anomalie P.S. ne signifie pas nécessairement l'absence de minéralisation. Tout dépend de la profondeur de celle-ci, de sa nature et de ses dimensions.

C'est pourquoi, quelles que soient la méthode employée et ses limites, il faut, dans la mesure du possible, faire des essais préliminaires sur un indice connu avant d'entreprendre la recherche systématique de l'étendue d'une minéralisation.

Parfois, une forte réaction P.S. peut n'être due qu'à la présence de graphite. Une étude géochimique ou géologique, par exemple, permettra de lever l'indétermination et, le cas échéant, de renoncer à l'emploi de la P.S.

Même dans les cas où la recherche directe par la P.S. n'est pas possible, la présence de graphite ou de charbon peut faciliter la prospection indirecte en fournissant des indications structurales.

C'est dire que la P.S. a doublement sa place dans les méthodes géophysiques. Il est étonnant de constater le mépris qu'elle inspire à certains prospecteurs ou auteurs. SEGUIN (1971) ne dit-il pas de cette méthode: „Il apparaît futile de traiter d'une théorie désuète et peu usitée.” N'est-ce pas plutôt le matériel présenté dans son livre qui est désuet? Trop lourd et peu maniable, il serait, de fait, inutilisable en montagne. C'est malheureusement le cas de la plupart des dispositifs P.S. exposés dans les catalogues d'appareils géophysiques: les électrodes en porcelaine sont fragiles et peu pratiques, les bobines de fil et les voltmètres lourds et encombrants.

Nos électrodes en bois et PVC ont l'avantage d'être incassables et étroites; on peut les enfoncer facilement dans le sol.

La „canette”, en dehors de certains inconvénients (perte du fil, utilisation impossible en zone habitée), a pour elle son faible volume; il n'y a pas de rebobinage du fil et la référence peut rester fixe même lors du changement de bobine. Si le fil est cassé, la boîte de compensation, conçue pour la correction immédiate du potentiel, permet un meilleur contrôle sur place.

Nos premiers essais dans les Alpes, bien qu'encore maladroits – nous utilisions alors le dispositif du „pas” et des électrodes en porcelaine –, donnèrent quelques résultats intéressants, notamment dans les sites suivants:

- A proximité de l'ancienne mine de cuivre de Baicolliou, près de Grimentz.
- Aux environs des indices de Pralong-Motec, entre Ayer et Zinal.
- Aux abords de l'ancienne exploitation de Ni et Co de Kaltenberg (cf. thèse de P. GEX, 1977).

Or, de nombreux indices minéralisés se succèdent du Val d'Hérens (Praz-Jean) au Turtmanntal (Kaltenberg), sans que l'on sache s'il y a une liaison entre eux. Dans ces pentes très raides, souvent recouvertes d'éboulis ou de moraine, seule une étude P.S. systématique permettrait de déterminer si cette continuité existe.

Par ailleurs, il serait intéressant d'effectuer quelques tests sur la molybdénite du Baldschiedertal pour savoir si elle s'accompagne d'une réaction P.S.

Il serait également intéressant de faire des essais sur les indices de la couverture du massif de l'Aar. Nous pensons notamment à certaines anomalies géochimiques découvertes par J.P. SAHEURS (1975) près de Trachsellaenen et à la prolongation du filon de Goppenstein en direction de Gampel.

Nous espérons poursuivre ces études commencées ou seulement projetées.

Cependant, jusqu'ici, l'essentiel de nos travaux a porté sur le Lötschental et nous a permis de suivre le filon de galène et de blende vers l'amont de la vallée. Or, H. Ledermann signale la présence de graphite dans ses coupes pétrographiques.

Il eût été dangereux, sans contrôle par la géochimie, d'attribuer aux sulfures les anomalies P.S. observées. Le graphite se présente en feuillets si minces que même les analyses aux rayons X, sur des surfaces grattées, n'ont pu le déceler; seuls le quartz, la muscovite, un plagioclase et la chlorite ont pu être déterminés. C'est la microsonde qui met le graphite en évidence de façon indubitable. On se demande comment ces feuillets créent une réaction de l'ordre du volt. Sans doute, leur conductibilité électrique est-elle continue et le cumul de leurs effets les rend-il assimilables à une plaque épaisse. Il faut ajouter que la forme des anomalies diffère d'un profil à l'autre, tantôt large et régulière, tantôt dessinant des pics étroits.

Il ne serait pas étonnant non plus que l'électrofiltration joue son rôle dans cette zone très écrasée et, de ce fait, plus poreuse et perméable que les niveaux qui l'entourent.

Il est possible aussi que les sulfures disséminés, que semblent révéler les teneurs élevées du fond géochimique, aient un effet sur les chutes de potentiel.

Ces différents facteurs rendent l'interprétation quantitative des profils difficile sinon impossible; les données géologiques sont, heureusement, assez nombreuses pour que celle-ci ne soit pas nécessaire.

Tel que nous l'avons effectué, l'échantillonnage des sols ne constitue pas, à proprement parler, une campagne géochimique. Nous limitant à la zone anormale géophysique, nous avons pour but de la mieux comprendre, dans l'espoir de confirmer l'hypothèse de la continuité du filon.

Lorsqu'une réaction P.S. coïncide avec une anomalie géochimique, cela est dû à la présence des sulfures, mais souvent sans doute aussi de graphite. En effet, la galène, minéral essentiel du filon, n'est pas réputée être un bon générateur de P.S.

Quoi qu'il en soit, la superposition des cartes géophysique et géochimique fait apparaître, dans l'ensemble, l'excellente concordance et la complémentarité de ces deux méthodes de prospection.

Contrairement à certain préjugé, malgré une forte pente et des sols hétérogènes, la géochimie donne de bons résultats, puisqu'elle nous permet d'affirmer que la minéralisation réapparaît sur près de 4 km à l'amont du Wilerbach; elle a révélé en outre de nombreuses anomalies dispersées et plus limitées en étendue.

Par exemple, le profil Go XII contient, en sus d'une importante anomalie située vers 2'550 m, des teneurs élevées en Ag vers 2'380 m ainsi qu'un échantillon riche en Pb, Zn, Cu et Ag à 2'624 m. Si

l'on tient compte aussi des fortes teneurs en Mo, on voit que cette région présente un réel intérêt minéralogique. De l'avis de J.P. Saheurs, tout le massif de l'Aar mériterait une prospection géochimique à mailles larges (stratégique).

L'emplacement des prélèvements en fonction de la topographie et de la minéralisation, ainsi que la géologie locale, ont rendu difficile l'application de la statistique à la détermination des seuils d'anomalie. Au calcul, nous avons préféré l'intuition ou le bon sens qui, paradoxalement, paraissent plus justes ou plus logiques. Mais les tests de normalité sur les valeurs brutes ou sur leur logarithme nous auront tout de même été utiles pour le calcul des coefficients de corrélation entre les éléments.

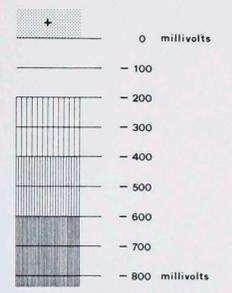
Nous espérons que les résultats auxquels nous sommes parvenus en géophysique et en géochimie éclaireront les trop nombreuses personnes qui doutent systématiquement de ces méthodes simples et peu coûteuses que sont la polarisation spontanée et l'analyse semi-quantitative.

Sans le moins du monde nier l'utilité de techniques perfectionnées — nous serions malvenus à le faire, ayant profité de l'ordinateur, du microanalyseur à sonde électronique et de l'absorption atomique —, nous avons voulu rendre leur juste valeur à des méthodes souvent mal connues, sous-estimées ou délaissées, et démontrer leur efficacité.

REFERENCES

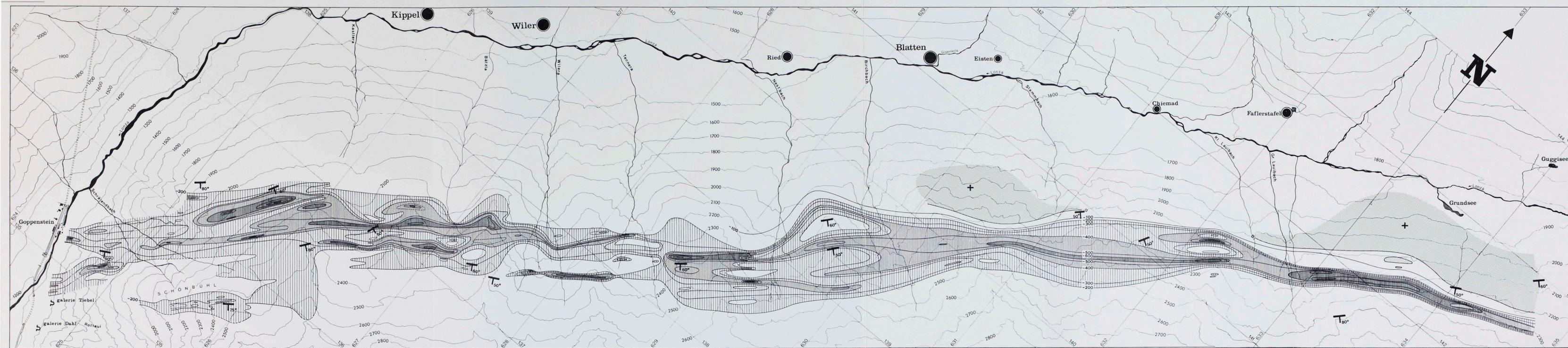
- BANERJEE, B. (1970): Interpretation of self-potential data for vertical sheets of infinite horizontal extension – Pure and appl. Geophys. 82, 238 – 250.
- BARBEY, O. (1933): Le gisement plombifère de Goppenstein – Thèse, Genève.
- DUGERDIL, Y. (1976): Prospection géochimique dans la région de Lovos (Laponie suédoise) – Thèse, Genève.
- DUPARC, L. (1901): Rapport sur les gisements de galène de Goppenstein (Vallée de la Lonza) – Doc. A.G.S., Berne (inééd.).
- FEHLMANN, H. (1947): Der schweizerische Bergbau während des zweiten Weltkrieges – Bur. für Bergbau, Berne, doc. A.G.S.
- FISHER, R.A., YATES, F. (1953): Statistical Tables for Biological, Agricultural and Medical Research – Oliver and Boyd, Edinburgh.
- GEX, P. (1977): La méthode de polarisation spontanée. Essai de réhabilitation – Thèse, Lausanne.
- GEX, P., MOREL, F. (1977): Mesures de polarisation spontanée sur les gîtes pyrito-cuprifères d'Alagna et d'Ollomont (Italie) – Bull. Lab. Géol. etc. Mus. géol. Univ. Lausanne, no. 221.
- HAWKES, H.E., WEBB, J.S. (1962): Geochemistry in mineral exploration – Harper & Row, New-York.
- HEILAND, C.A. (1940): Geophysical Exploration – Prentice Hall, New-York.
- HIGGINS, M.W. (1971): Cataclastic Rocks – U.S. geol. Surv. prof. Pap. 687.
- HUTTENLOCHER, H.F. (1931): Die Blei-Zinklagerstätten von Goppenstein (Wallis) – Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser., Liefg. 16, H. 2, 1 – 47.
- JACQUESON, R., MELOUX, J. (1973): Le filon plombo-zincifère de Goppenstein (Valais – Suisse) – Rapp. inéd. B.R.G.M.
- KELLER, V.G., FRISCHKNECHT, F.C. (1966): Electrical methods in geophysical prospecting – Pergamon Press, New-York.
- LAFFITE, P. (1972): Traité d'informatique géologique – Masson, Paris.
- LE BEL, L., ZWAHLEN, F. (1971): Etude des courants spontanés sur le site de la mine de Salanfe, en Valais – Trav. dipl. Univ. Lausanne.
- LEDERMANN, H. (1942): Das petrographische Profil im Wasserstollen der Lonzawerke Hohsteg-Mitthal (westl. Aarmassiv) – Schweiz. mineral. petrogr. Mitt., Bd. 22.
- (1945): Petrographische Untersuchungen in der nördlichen Schieferhülle des zentralen Aaregranites im obern Lötschental, Schweiz. mineral. petrogr. Mitt., Bd. 25, H. 2.
- LOGN, Ø., BØLVIKEN, B. (1974): Self potentials at the Joma pyrite deposit, Norway – Geoexploration, 12, 11 – 28.
- LOUP, G., WOODTLI, R. (1965 a): Une prospection géochimique stratégique dans la région d'Alesses (Valais) – Bull. Lab. Géol. etc. Mus. géol. Univ. Lausanne, no. 157, 1 – 6.
- (1965 b): Deux exemples de prospection géochimique en Valais: sur l'indice de Cocorier et sur la mine de Bruson – Bull. Lab. Géol. etc. Mus. géol. Univ. Lausanne, no. 157, 7 – 15.
- PARASNIS, D.S. (1973): Mining Geophysics – Elsevier, Amsterdam.
- POLDINI, E. (1938): Les phénomènes de la polarisation spontanée électrique du sous-sol et leur application à la recherche des gîtes métallifères – Bull. Lab. Géol. etc. Univ. Lausanne, no. 61.
- (1947): La prospection électrique du sous-sol – Rouge S.A., Lausanne.
- SAHEURS, J.P. (1975): Geochemische Prospektion im Gebiet der Blei-Zink-Baryt-Lagerstätten bei Trachsellauenen (Berner Oberland, Schweiz) – Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser., Liefg. 55.
- SATO, M., MOONEY, H.M. (1960): The electrochemical mechanism of sulphide self potentials – Geophysics 25, no. 1, 226 – 249.
- SCHLUMBERGER, M. (1920): Etude sur la prospection électrique du sous-sol – Gauthier-Villard, Paris.
- SCHMIDT, C. (1914): Rapport d'expertise sur la mine de galène dans le Lötschental (Valais) – Doc. A.G.S., Berne (inééd.).
- SCHWARTZ, D. (1963): Méthodes statistiques à l'usage des médecins et des biologistes – Flammarion, Paris.
- SEGUIN, M.K. (1971): La géophysique et les propriétés physiques des roches – Presse Univ. Laval, Québec.
- SIEGEL, F.R. (1974): Applied Geochemistry – Wiley, New-York.
- SIEGEN, J. (1972): Le Lötschental – Ed. des Terreaux, Lausanne.
- STECK, A., HÜGI, Th. (1970): Das Auftreten des Molybdänglanzes im westlichen Aarmassiv und Molybdängehalte von Gesteinen der gleichen Region – Schweiz. mineral. petrogr. Mitt., Bd. 50, H. 2.
- WARD, F.N., LAKIN, H.W., CANNEY, F.C. & others (1963): Analytical Methods Used in Geochemical Exploration by the U.S. Geological Survey – U.S. geol. Surv. Bull. 1152.
- WILCKENS, F. (1955): Die Grundlagen der Eigenpotential-Methode. Zeitschr. f. Geophys. 21, 25 – 40.

LÖTSCHENTAL
CARTE DES EQUIPOTENTIELLES
POLARISATION SPONTANEE (P.S.)



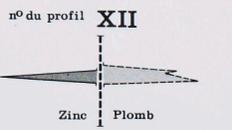
Echelle: 0 0.5 km

Direction et pendage des couches



LÖTSCHENTAL
CARTE
DES ANOMALIES GEOCHIMIQUES

- Argent
- ◄ Cuivre
- Molybdène



La grosseur des points est proportionnelle à l'extension de l'anomalie.

Echelle: 1cm ~ 200 ppm
0 0.5 km

