

|                     |   |
|---------------------|---|
| <b>Zeitschrift:</b> | Archives des sciences et compte rendu des séances de la Société   |
| <b>Herausgeber:</b> | Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève   |
| <b>Band:</b>        | 40 (1987)   |
| <b>Heft:</b>        | 2: Archives des Sciences  |
| <br><b>Artikel:</b> | Application de la méthode Very Low Frequency : résistivité à l'étude des mofettes de la région de Scuol (Basse-Engadine, Grisons, Suisse) |
| <b>Autor:</b>       | Wexsteen, P. / Müller, I.   |
| <b>DOI:</b>         | <a href="https://doi.org/10.5169/seals-740312">https://doi.org/10.5169/seals-740312</a>   |

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 25.12.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# APPLICATION DE LA MÉTHODE VERY LOW FREQUENCY — RÉSISTIVITÉ À L'ÉTUDE DES MOFETTES DE LA RÉGION DE SCUOL (Basse-Engadine, Grisons, Suisse)

PAR

**P. WEXSTEEN<sup>1</sup> et I. MÜLLER<sup>2</sup>**

## RÉSUMÉ

Au NW de la commune de Scuol, en Basse-Engadine, le gaz CO<sub>2</sub> qui est associé aux eaux minérales de cette région, émane du sol parfois par de véritables mofettes.

Pour déterminer les mécanismes de remontée du gaz à la surface, la méthode de prospection géophysique électromagnétique VLF-R (Very Low Frequency-Resistivity) a été appliquée.

Dans la région étudiée, l'anticlinorium composé de schistes lustrés est recouvert de 15 à 20 mètres de moraine. L'axe de l'anticlinorium est orienté N 60°.

La moraine estompe l'image des émanations gazeuses dans le substratum mais, avec une perméabilité qui peut être estimée à 10<sup>-4</sup> m/s, elle ne représente pas d'obstacles à la circulation du gaz.

Cette méthode a permis de vérifier le développement de la fracturation des schistes lustrés sous-jacents de manière semi-quantitative:

- les schistes lustrés sont relativement isotropes et donc très tectonisés;
- les fractures orientées N 150° correspondent à l'existence de diaclases ouvertes de tension  $\tau_1$  perpendiculaires à l'axe de l'anticlinorium qui favorisent la circulation du gaz;
- les familles de fractures orientées N-S représentent probablement les cisaillements senestres et les fractures orientées N 110° pourraient être l'expression des cisaillements dextres;
- l'alignement des mofettes qui émergent du recouvrement morainique correspondent dans l'anticlinorium des schistes lustrés à la direction de l'allongement de celui-ci.

## ABSTRACT

The region of Scuol in the Lower-Engadine is known for the presences of mofettes through which CO<sub>2</sub> gas emerges directly at the surface.

In order to acquire to a better understanding about the emergences of gas at the surface, geophysical measurements have been carried out with the VLF-R method (Very-Low Frequency-Resistivity).

In the area under study an anticlinorium composed of Bünderschiefer is covered by a morainic deposit of an average thickness of 15 to 20 meters. The axis of the anticlinorium has a direction of N 60°.

<sup>1</sup> Département de Minéralogie, Université de Genève, 13, rue des Maraîchers, 1211 Genève 4, Suisse.

<sup>2</sup> Centre d'hydrogéologie, Université de Neuchâtel, rue E.-Argand 11, 2007 Neuchâtel, Suisse.

The permeability of the moraine estimated at  $10^{-4}$  m/s does not prevent the emergence of the gas with a certain degree of diffusion.

The fracture pattern in the Bünderschiefer has been verified by geophysical investigations with the following results:

- the Bünderschiefer are generally isotropic and strongly tectonised;
- N 150° oriented fractures, which permit the emergence of the gas, are due to the existence of tension joint  $\tau_1$  perpendicular to the axis of the anticlinorium;
- the NS oriented fractures represent probably senestral shears whereas the N 110° oriented fractures may represent dextral shears;
- in the anticlinorium of the underlying Bünderschiefer, the alignment of the mofettes, which emerge from the morainic cover, corresponds to the elongation of the main direction prevailing in this structure.

## 1. INTRODUCTION

En Basse-Engadine, onze sources minérales et gazeuses émergent dans la région de Scuol-Tarasp (fig. 1). Les eaux captées par les deux communes à des fins thérapeutiques ainsi que celles non captées ont été étudiées dans le cadre d'une thèse de doctorat (Wexsteen, 1987).

Dans cette région, le gaz CO<sub>2</sub> n'est pas seulement présent dans l'eau des sources, mais dans la région au NW du village de Scuol il émane d'une façon irrégulière du sol sur une surface de plusieurs km<sup>2</sup>, parfois par de véritables mofettes. La quantité globale qui s'échappe a été estimée à plusieurs milliers de mètres cubes par jour (Schmassmann, 1984).

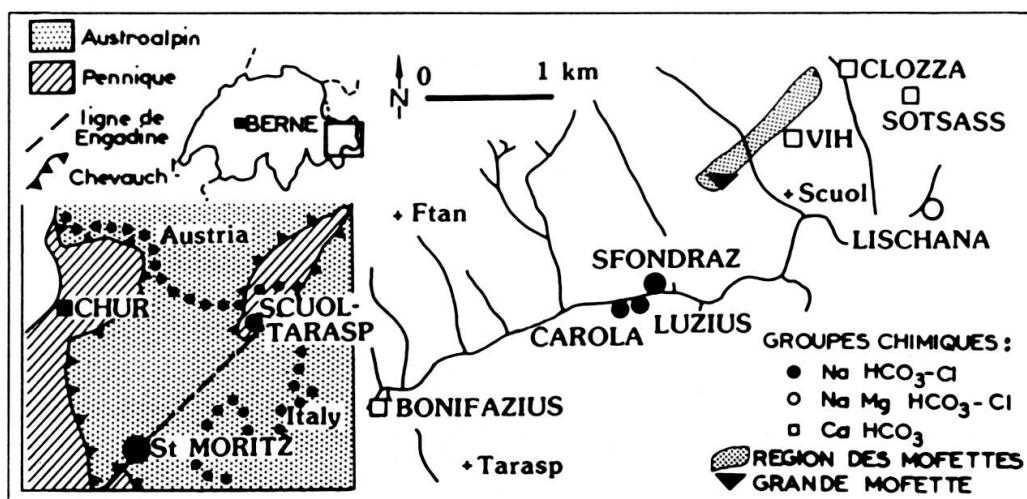


FIG. 1.

Localisation des sources minérales et riches en CO<sub>2</sub> de Scuol-Tarasp et de la zone des mofettes de Scuol (dans la fenêtre de la Basse-Engadine).

Sur le terrain, les mofettes sont repérables par leurs effets sur la flore (herbe jaunie) et la multitude de petits animaux morts, ainsi que certains jours par leur odeur désagréable. Les émanations gazeuses semblent s'aligner dans une direction identique à celle des structures géologiques régionales (fig. 2).

Dans la fenêtre de la Basse-Engadine affleurent partout les schistes lustrés (Bünderschiefer) et les ophiolites du domaine pennique (fig. 1). Les schistes lustrés peuvent être de lithologie différente: «marno-calcaire», «argileuse» ou «gréseuse». Ils sont plissés en anticlinorium sous les nappes austroalpines qui les surmontent. La ligne de l'Engadine de direction générale SW-NE qui prend son origine en Haute-Engadine constitue un des accidents tectoniques majeurs dans la région (Cadisch, 1968).

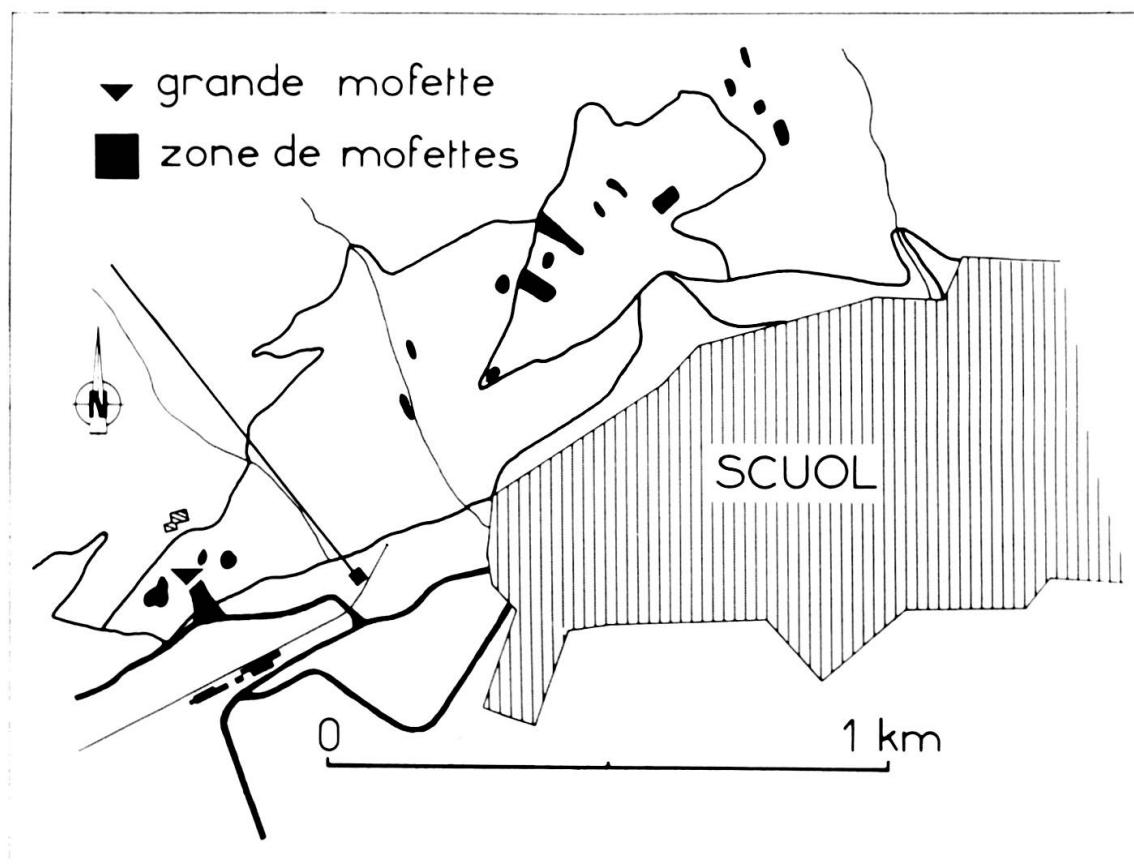


FIG. 2.

Zone des mofettes au NW du village de Scuol.

*Les mofettes suivent une direction générale SW-NE (T. Lardelli, communication personnelle, 1979).*

Dans une étude en cours, un échantillonnage systématique de toutes les sources minérales et gazeuses ainsi que de certaines eaux de surface a été réalisé périodiquement au cours d'un cycle hydrologique complet (1984-1986).

La variabilité temporelle maximale des paramètres physico-chimiques et simultanément des paramètres isotopiques des eaux étudiées a été vérifiée en fonction du régime hydrologique local. L'étude des paramètres géochimiques et isotopiques des fluides a permis d'établir l'importance des interactions complexes eau-roche en présence de gaz  $\text{CO}_2$  et leur évolution au cours de l'ensemble de la circulation souterraine de ces fluides (Wexsteen, 1987).

Dans cette étude, les dégagements gazeux ont fait l'objet de prélèvements sur un certain nombre d'émergences à Scuol-Tarasp en vue de quantifier la composition chimique et de connaître l'origine du  $\text{CO}_2$ . Pour chaque source ainsi que pour les mofettes, les compositions chimiques des gaz sont identiques.

La teneur en  $\text{CO}_2$ , 94 Vol. %, constitue l'essentiel de cette composition. La plupart des teneurs isotopiques en carbone-13 relatives au  $\text{CO}_2$  des sources et mofettes sont regroupées dans l'intervalle – 3 à – 4.5‰. Cette teneur est caractéristique d'un gaz d'origine inorganique endogène résultant d'un métamorphisme de roches carbonatées (Wexsteen, 1986). La bonne concordance aussi bien des teneurs isotopiques que des compositions chimiques des gaz confirme l'existence d'une source commune en profondeur.

Si l'hypothèse d'un mécanisme de remontée du gaz lié à une tectonique de fractures profondes semble la plus vraisemblable, elle est difficilement vérifiable sur le terrain. Jusqu'à présent, aucune étude géophysique connue n'a pu mettre en évidence de structure géologique particulière liée à des émanations de gaz dans cette région.

Il a donc été décidé de réaliser une prospection géophysique moderne à l'aide du matériel électromagnétique VLF-R 15-240 KHz (Very Low Frequency-Resistivity), mis au point et expérimenté par l'un des auteurs (I. M.).

Le but de cette prospection est d'établir les relations spatiales existantes entre la répartition des mofettes en surface et la position des fractures dans les schistes lustrés qui se trouvent sous la couverture morainique affleurante. En outre, on veut vérifier le type de fracturation existant dans les schistes lustrés sous-jacents et mettre en évidence les fractures qui favorisent la circulation des gaz dans les schistes lustrés.

## 2. MÉTHODE ÉLECTROMAGNÉTIQUE UTILISÉE

### *Principe de la méthode VLF-Resistivity*

L'onde électromagnétique produite par des émetteurs VLF répartis en divers points du globe, peut être avantageusement utilisée comme source d'énergie pour la prospection géophysique (Keller and Frischknecht, 1979). Le récepteur VLF mesure l'intensité de la composante  $\text{H}_\text{y}$  du champ magnétique du signal par son antenne et la composante  $\text{E}_\text{x}$  du champ électrique induit dans le sol, à l'aide de deux électrodes.

Connaissant la fréquence de l'émetteur (F), il est possible de calculer la résistivité apparente de la roche (1) et de déterminer également la profondeur d'investigation (2) à laquelle on opère:

$$\rho_a = \left( \frac{Ex}{Hy} \right)^2 \frac{1}{2\pi \cdot \mu_0 \cdot F} \quad (1)$$

$$P_{(m)} = 503 \sqrt{\rho_a / F} \quad (2)$$

$\rho_a$  en Ohm.m; Ex en Volt/m; Hy en Ampère/m;  $\mu_0$  en Henry/m (ici constante:  $\pi \cdot 4 \cdot 10^{-7}$ ); F en Hertz.

Les émetteurs VLF sont nombreux et émettent chacun dans toutes les directions. Le récepteur VLF, prototype construit par l'un des auteurs (I. M.), peut capter une soixantaine d'émetteurs entre 15 et 240 KHz. A chaque station, ceci a permis d'effectuer rapidement plusieurs mesures correspondant à des profondeurs d'investigation différentes.

Les mesures étant directionnelles, l'anisotropie électrique de la roche peut être analysée rapidement en tenant compte des deux paramètres suivants:

- une valeur de la résistivité apparente (Ohm.m) qui caractérise la nature lithologique des formations géologiques;
- une valeur de la «phase» entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$ . Il s'agit d'une valeur de déphasage entre les composantes électrique et magnétique du signal, polarisé perpendiculairement quand il progresse dans une masse homogène et isotrope. Dans ce cas, cette valeur est de  $45^\circ$  dans toutes les directions de mesure. Un déphasage différent de  $45^\circ$  signifie par contre que la roche est anisotrope en raison, par exemple, de la stratification, de la schistosité ou de la fracturation, dont les effets peuvent bien sûr être cumulés.

Quand une fracture subverticale et électriquement conductrice se développe dans une roche résistante, comme dans le cadre de cette étude, il est toujours possible d'effectuer des mesures VLF parallèlement et perpendiculaires à son tracé. On parlera alors de mesures en situation de «Polarisation E», parallèles au conducteur, et de «Polarisation H» perpendiculaires au conducteur (Fischer *et al.*, 1983).

Un conducteur va augmenter ou diminuer la valeur de la résistivité et de la phase comme suit:

- polarisation E: augmentation de la résistivité et diminution de la phase;
- polarisation H: diminution de la résistivité et augmentation de la phase.

En effectuant à la même station plusieurs mesures directionnelles, il est dès lors possible de rechercher la direction de résistivité maximale et en même temps de phase minimale, qui identifie la direction de la fissuration (Müller *et al.*, 1984).

Grâce à ce principe et à l'aide du degré d'anisotropie de la station de mesure, exprimé par le rapport de la plus grande et de la plus petite résistivité, et par la différence maximale des déphasages de cette station, il est possible d'analyser la fracturation en profondeur d'une région donnée de manière semi-quantitative (Müller, 1983).

#### 4. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

A chacune des 202 stations de mesure, la résistivité apparente des terrains et la phase correspondante ont été relevées à différentes fréquences (Annexe). Les fréquences utilisées sont comprises dans l'intervalle 15-240 KHz.

L'annexe contient l'ensemble de ces mesures effectuées le long de douze profils supposés recouvrant les structures géologiques régionales (fig. 3).

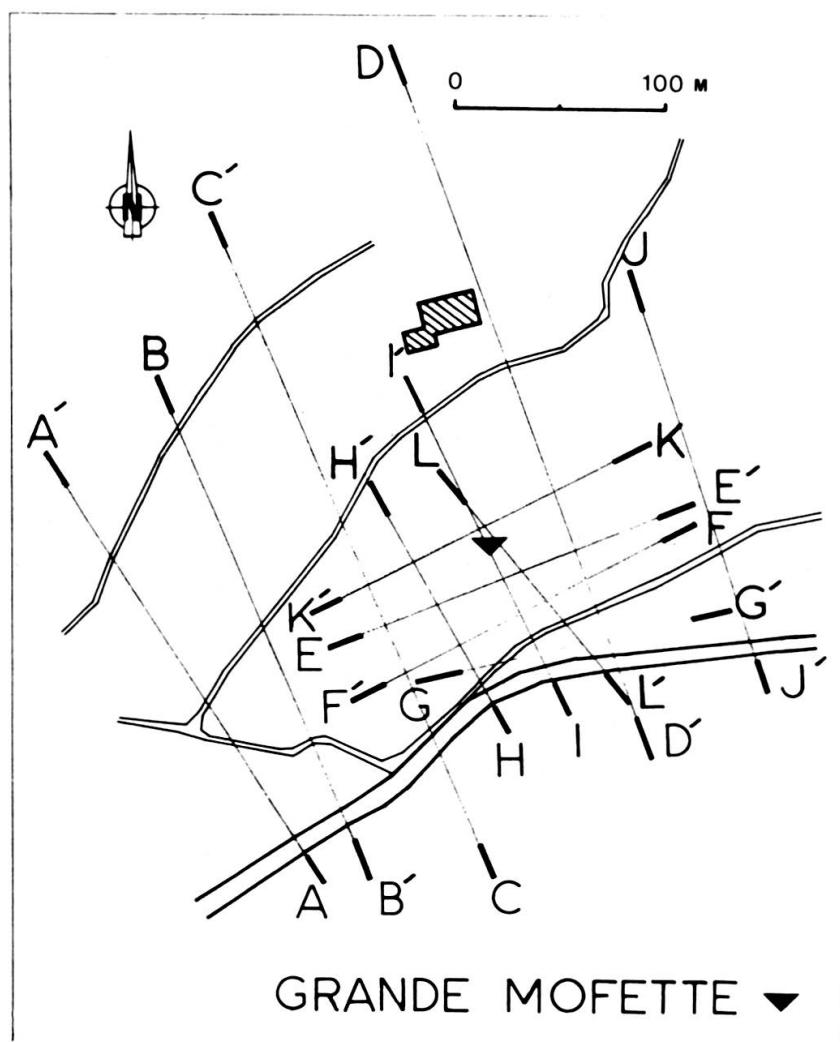
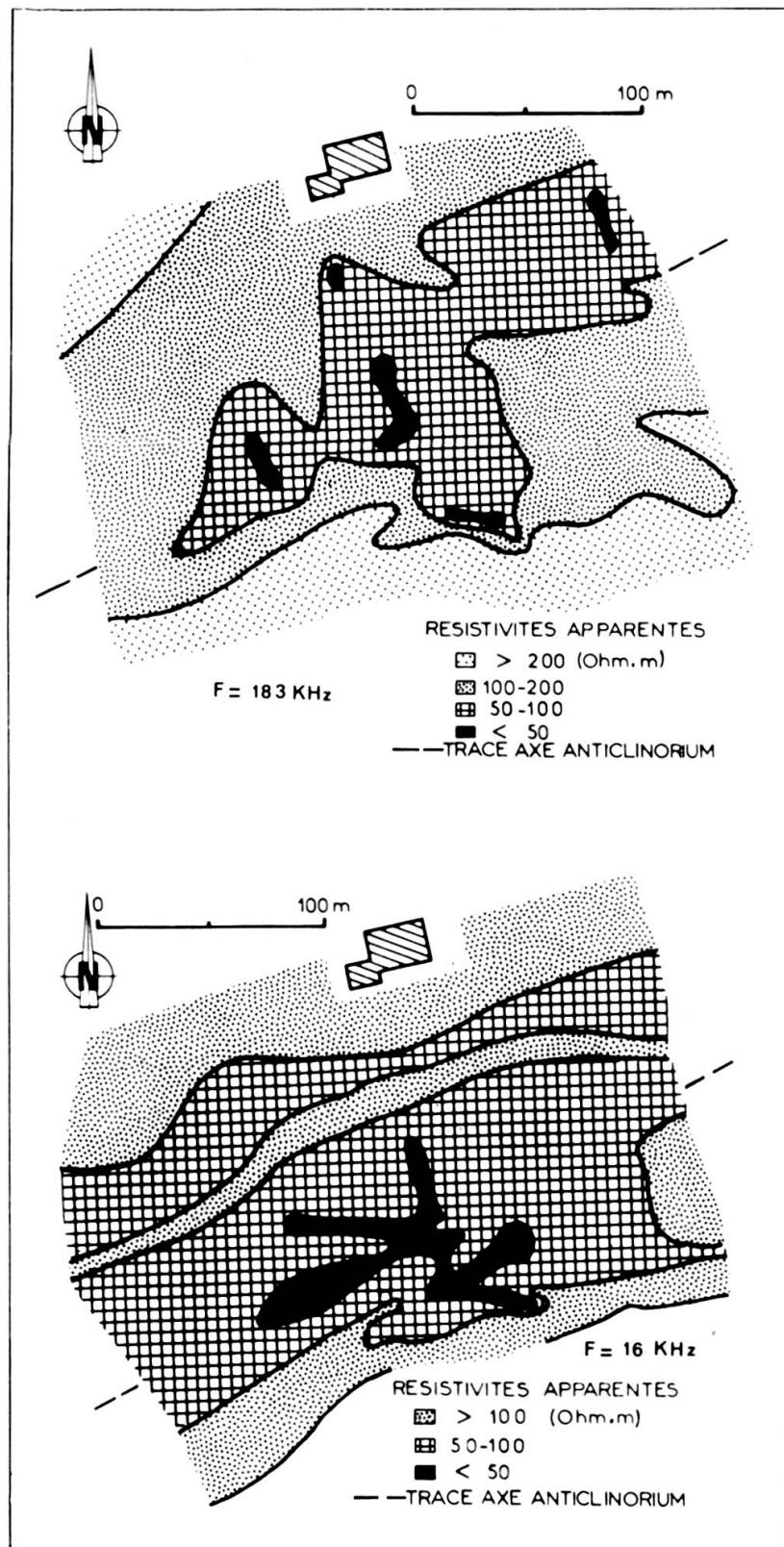


FIG. 3.

Orientation des 12 profils de mesures.

*Les profils A, B, C, D, J recouvrent l'anticlinorium de Scuol et les autres cernent de plus près la zone de la grande mofette.*



FIGS. 4 ET 5.

Carte des isorésistivités apparentes relevées à une fréquence de 183 KHz et à une fréquence de 16 KHz correspondantes respectivement à des profondeurs d'investigation de 15 à 20 mètres et de 45 à 60 mètres.

Les zones à résistivités apparentes inférieures à 50 ohm.m (en noir) sont très dispersées soulignant ainsi le rôle dispersif de la moraine dans les émanations gazeuses depuis les schistes lustriés sous-jacents (fig. 4).

Les isorésistivités apparentes inférieures à 50 ohm.m (en noir) représentent les zones très conductrices, c'est-à-dire les émanations intenses de gaz dans les schistes lustriés. Elles sont concentrées et semblent s'orienter selon des directions préférentielles (fig. 5).

Sur la base des résultats obtenus, deux cartes d'isorésistivités ont été réalisées:

- une carte de résistivités apparentes relevées à la fréquence de 183 KHz (fig. 4), et
- une carte de résistivités relevées à la fréquence de 16 KHz (fig. 5).

Les résistivités apparentes relevées à 16 KHz donnent l'allure des schistes lustrés non affleurant (fig. 5). En effet, les profondeurs d'investigation pénètrent profondément dans ceux-ci, jusqu'à 60 mètres. Les faibles résistivités ( $< 50 \text{ ohm.m}$ ) sont concentrées et semblent s'orienter dans des directions préférentielles. D'autre part, l'alternance des zones à résistivités supérieures à  $50 \text{ ohm.m}$  permettent de mettre en évidence les différents faciès lithologiques des schistes lustrés qui correspondent vraisemblablement à ceux décrits par Cadisch (1968):

- le faciès argileux dans la gamme de 50 à 100 ohm.m;
- le faciès marnocalcaire dans la gamme de 100 à 200 ohm.m;
- le faciès gréseux dans celle supérieure à 200 ohm.m. Ce faciès est situé principalement dans la partie nord de la zone étudiée. L'orientation des zones à différentes résistivités coïncide avec la direction de l'axe de l'anticlinorium (Cadisch, 1968) dans le toit duquel se situent les schistes argileux ainsi que les mofettes.

Pour la carte des résistivités apparentes relevées à 183 KHz, la profondeur d'investigation varie de 15 à 20 m (fig. 5). En comparaison avec le substratum, ces couches plus superficielles et plus résistantes ( $> 100 \text{ ohm.m}$ ) sont l'expression géophysique de la couverture morainique. Dans celle-ci, les zones à faibles résistivités ( $< 50 \text{ ohm.m}$ ) sont discontinues et correspondent aux émanations de gaz qui ont probablement altéré la matrice de la moraine à cause de son agressivité. On estime que la perméabilité d'une moraine possédant de telles caractéristiques géophysiques est de l'ordre de  $10^{-4} \text{ m/s}$ .

Les zones à résistivités apparentes comprises entre 50 et 100 ohm.m sont interprétées comme des terrains imprégnés plus faiblement par le gaz et soulignent ainsi son rôle dispersif dans les phénomènes d'émanations du gaz.

Afin de vérifier la fracturation des schistes lustrés sous la couverture morainique, des mesures ont été effectuées dans le domaine de 20 KHz et selon quatre directions: N-S, N 50°, N 110° et N 140° (fig. 6). Ces directions ont été déterminées en fonction de l'orientation des structures géologiques locales décrites par Cadisch (1968).

Le coefficient d'anisotropie de la résistivité a été calculé en divisant la plus grande par la plus petite résistivité de la station. Le coefficient ainsi obtenu a été reporté dans la direction de la grande résistivité (direction de la polarisation E). En même temps, la direction de la plus petite phase est représentée à chaque station (direction de la polarisation E).

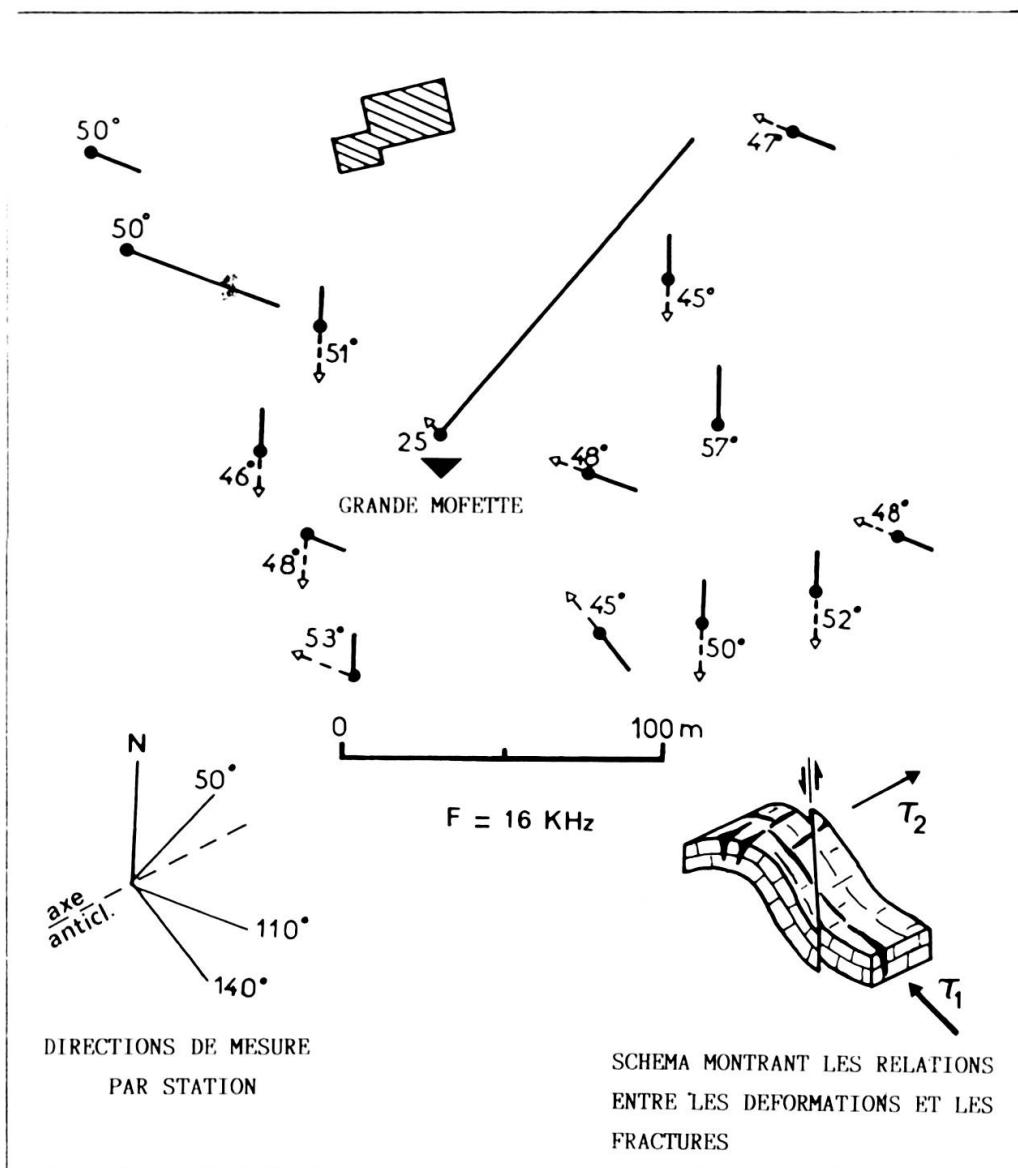


FIG. 6.

Orientation du coefficient d'anisotropie de la résistivité et de la plus petite phase à chaque station de mesures pluridirectionnelles dans la région de la grande mofette.

A chaque station les mesures ont été réalisées dans les directions suivantes: NS, N50°, N110° et N140° (figure en bas à gauche).

En trait plein, le coefficient d'anisotropie a été reporté dans la direction de la plus grande résistivité (direction de polarisation «E»). En général, la valeur de ce coefficient est proche de 1. L'orientation de la plus petite phase (direction de polarisation «H») a été représentée en trait discontinu.

L'alignement de ces deux paramètres indique la direction des conducteurs. Celle-ci est comparée, dans la figure en bas à droite, à un schéma montrant les relations entre l'orientation des déformations et celle des fractures. Ce schéma est lui-même orienté selon l'axe principal de l'anticlinorium (Cadisch, 1968).

L'alignement le plus fréquent de ces deux paramètres est dans la direction N-S correspondante aux cisaillements senestres. Par contre, les conducteurs orientés N110° correspondent aux cisaillements dextres (non représentés sur la figure en bas à droite) et les conducteurs orientés N150° aux diaclases ouvertes de tension  $\tau_1$  par lesquelles s'effectue le dégazage.

Dans les cas de deux paramètres non alignés, il faut prendre en considération la direction de la plus petite phase.

Théoriquement les deux grandeurs devraient avoir la même direction et indiquer ainsi l'orientation des conducteurs. Les conducteurs peuvent être des éléments tectoniques ou stratigraphiques. Les exceptions à cette règle sont d'importance secondaire dont la nature exacte n'est pas totalement comprise encore actuellement. Cependant, en se basant sur l'expérience acquise lors de l'utilisation de la méthode géophysique utilisée, on donne priorité à la direction de la phase pour orienter les conducteurs.

L'absence d'une anisotropie marquée est interprétée comme un signe de tectonisation intense du substratum (fig. 6). En effet, les nombreuses familles de fractures injectées de gaz confèrent à la roche des propriétés électriques identiques dans toutes les directions mesurées.

Néanmoins, en se référant à un schéma montrant le développement de la fracturation suivant l'orientation des déformations structurales (Suppe, 1985), quelques tendances apparaissent : la plus grande fréquence dans l'alignement des conducteurs est marquée par les petites phases orientées dans la direction N-S. Il s'agirait des fractures relatives aux directions de cisaillements senestres (fig. 6).

Les directions des phases et résistivités des autres stations indiqueraient l'existence de conducteurs orientés N 110° assimilables dans ce cas aux directions de

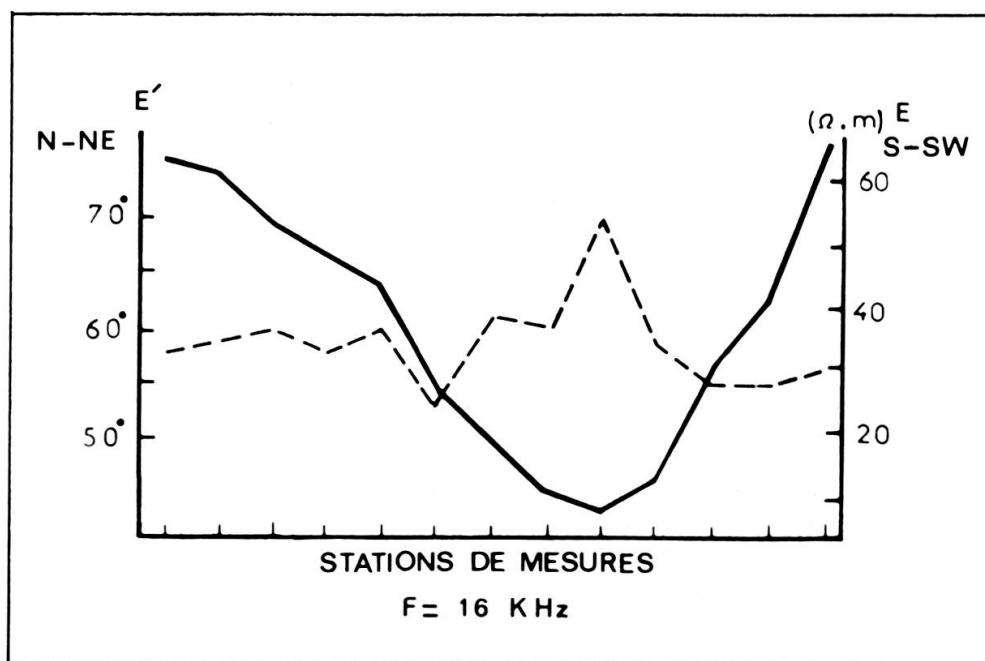


FIG. 7.

Résistivités apparentes et phases correspondantes mesurées le long du profil E' E.

Espacement des mesures: 5 mètres.

Le profil est orienté perpendiculairement à l'alignement des diaclases ouvertes afin de se placer en situation de polarisation «H».

L'existence d'une zone conductrice de l'ordre de 10 mètres de largeur dans laquelle a lieu un dégagement important des gaz est mise en évidence par une diminution très importante de la résistivité accompagnée par une augmentation de la phase.

cisaillements dextres. La dernière famille de fractures concerne des stations positionnées sur les mofettes les plus intenses en surface. Les alignements du coefficient d'anisotropie de la résistivité et de la plus petite phase indiquent que ces fractures sont orientées dans la direction N 150°. En d'autres termes, il apparaît que les mofettes à fort débit peuvent être mises en relation avec les diaclases ouvertes de tension  $\tau_1$ .

Pour compléter les investigations, le profil EE' a été orienté perpendiculairement à l'alignement de mofettes orienté N 150° (fig. 9). Placé en situation de «Polarisation H» ce profil confirme l'hypothèse de la présence de diaclases ouvertes. Il est possible d'observer une zone conductrice de 10 mètres de largeur par une diminution très importante de la résistivité accompagnée d'une augmentation de la phase.

La fracturation dans les schistes lustrés a été comparée à la répartition des zones à faibles résistivités dans ces mêmes schistes lustrés (fig. 6 et fig. 5). Les directions préférentielles selon lesquelles les émanations de gaz sont orientées dans cet horizon correspondent à une imprégnation du gaz dans les différentes fractures réparties autour des circulations à gros débit.

La comparaison entre la fracturation des schistes lustrés et la situation des mofettes dans les couches plus superficielles permet d'énoncer que la moraine estompe l'image de la fracturation du substratum. Par contre, l'alignement discontinu des mofettes sur 2 km au nord et à l'ouest du village de Scuol est directement lié à la direction de l'allongement tel qu'il a été vérifié dans les schistes lustrés.

## 5. CONCLUSIONS

La prospection électromagnétique VLF-Résistivité a permis de mettre en évidence que les schistes lustrés au NW de la commune de Scuol sont couverts de 15 à 20 m de moraine. Celle-ci apparaît comme relativement perméable sur le plan hydrogéologique et ne représente aucun obstacle aux émanations gazeuses. Sur la base des valeurs de sa résistivité (200 ohm.m), on estime que sa perméabilité est de l'ordre de  $10^{-4}$  m/s.

Avec une profondeur d'investigation de l'ordre de 60 m de profondeur, la méthode utilisée a permis de mettre en évidence:

- les différentes séquences lithologiques des schistes lustrés sous la couverture morainique: un faciès «marnocalcaire», un faciès «argileux» et un faciès «gréseux»;
- le toit de l'anticlinorium dont l'axe est orienté N 60° conformément aux hypothèses de Cadisch (1968).

Les coefficients d'anisotropie de la résistivité ont montré que le substratum apparaît relativement isotrope. Malgré tout, le modèle de fracturation dans les schistes lustrés a été vérifié.

L'alignement de conducteurs dans la direction N 150° correspondent aux diaclases ouvertes de tension  $\tau_1$  qui permettent probablement le dégazage.

Les familles de fractures les plus fréquemment développées dans les schistes lustrés sont orientées N-S. Elles représentent les mouvements de cisaillements senestres, les familles de fractures N 110° étant les traces de cisaillements dextres. (Ces derniers n'apparaissent pas sur la figure 6, en bas à droite.)

Sur le toit de l'anticlinorium les diverses zones de mofettes sont alignées dans la direction de la contrainte  $\tau_2$  (N 60°) et dans chaque zone les mofettes les plus intenses sont réparties selon la direction de la contrainte  $\tau_1$  (N 150°). Ces deux directions facilement repérables sur le terrain soulignent les déformations principales dans la région étudiée.

Enfin, il a été établi que d'une façon générale les émanations gazeuses les plus intenses dans la moraine sont directement liées à des fractures ouvertes dans les schistes lustrés. Par contre, l'ensemble des émanations réparties sur la moraine ne peuvent pas être mises en relation directe avec la position des mofettes dans les schistes lustrés sous-jacents car la moraine joue un rôle dispersif dans le système de circulation du gaz CO<sub>2</sub>.

Cette étude a permis de vérifier la validité de l'approche géophysique du problème des mofettes par la méthode VLF appliquée. Il faut donc espérer que des études par cette méthode puissent être continuées et approfondies.

#### REMERCIEMENTS

Les auteurs expriment leur reconnaissance aux personnes et organismes suivants qui ont contribué à la réussite de cette étude.

Le professeur F. Jaffé du Département de minéralogie de l'Université de Genève pour avoir conçu l'idée d'une approche géophysique et en avoir suivi avec intérêt l'évolution.

Le professeur G. Fischer de l'Observatoire cantonal de Neuchâtel pour la mise à disposition de l'algorythme magnétotellurique qui a permis de calculer l'épaisseur des couches.

La commune de Scuol, en la personne de M. D. Bishoff, Präsident der Bürgergemeinde, ainsi que M. J. Corradin, directeur technique de la commune, pour leur accueil chaleureux et leur aide sur place.

Le Fonds national suisse de la recherche scientifique (FNRS) pour avoir subventionné cette étude.

M. V. Angelillo, ingénieur-géologue, du Département de minéralogie de l'Université de Genève pour la lecture critique mais constructive du manuscrit.

## A N N E X E

No station - Résistivité / phase - relevées aux fréquences: 183 HKz 81HKz 16HKz

## PROFIL A Direction S-N

|                          |                         |                         |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1- 146/44 138/44 101/54  | 2- 253/42 241/47 138/55 | 3- 238/45 203/48 111/55 |
| 4- 240/47 179/57 91/60   | 5- 203/55 141/60 76/58  | 6- 115/52 93/55 61/51   |
| 7- 139/52 105/55 73/50   | 8- 174/55 114/57 72/53  | 9- 160/58 107/64 62/53  |
| 10- 323/54 211/55 160/47 |                         |                         |

## PROFIL B Direction N-S

|                          |                          |
|--------------------------|--------------------------|
| 11- 244/40 230/46 211/45 | 12- 220/45 180/50 142/47 |
| 13- 172/47 148/49 114/50 | 14- 115/49 95/51 68/52   |
| 16- 140/53 105/54 79/72  | 17- 116/56 91/55 52/51   |
| 19- 236/41 236/47 148/54 | 20- 215/42 203/47 130/55 |
| 22- 87/33 90/42 84/52    | 21- 118/35 130/42 105/54 |

## PROFIL C Direction S-N

|                          |                          |
|--------------------------|--------------------------|
| 23- 132/30 127/45        | 24- 100/40 105/43 78/54  |
| 25- 240/38 205/47 140/53 | 26- 209/40 156/55 90/58  |
| 28- 198/50 130/60 71/61  | 29- 70/61 40/64 21/57    |
| 31- 65/30 75/48 53/51    | 32- 117/33 112/44 95/49  |
| 34- 130/40 153/54 80/58  | 35- 194/47 165/51 108/51 |
| 37- 181/50 141/52 100/50 | 38- 227/47 181/51 141/47 |
| 40- 253/47 204/50 190/44 | 41- 220/46 172/55 110/50 |

## PROFIL D Direction N-S

|                          |                          |                          |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 43- 354/45 283/50 175/50 | 44- 395/47 320/48 210/50 | 45- 173/50 132/53 73/54  |
| 46- 260/49 196/55 115/53 | 47- 283/45 220/50 140/53 | 48- 320/42 297/53 146/55 |
| 49- 360/40 332/47 217/51 | 50- 190/45 166/50 106/53 | 51- 183/45 187/47 123/50 |
| 52- 130/35 158/46 121/51 | 53- 99/42 88/50 67/55    | 54- 137/38 149/44 118/51 |
| 55- 95/45 80/50 62/55    | 56- 78/42 80/47 57/54    | 57- 106/44 84/52 62/55   |
| 58- 98/43 90/43 73/52    | 59- 91/44 83/46 65/51    | 60- 115/45 110/47 86/52  |
| 61- 97/37 95/45 77/52    | 62- 155/39 170/43 121/51 | 63- 195/37 208/42 152/52 |
| 64- 62/43 75/27 88/45    |                          |                          |

## PROFIL E Direction E-W

|                 |            |             |
|-----------------|------------|-------------|
| 142- 55/55 143- | 41/55 144- | 141- 70/56  |
| 145- 6/70 146-  | 11/60 147- | 13/59 24/61 |
| 148- 36/53 149- | 61/60 150- | 68/58       |
| 151- 75/60 152- | 88/59 153- | 92/58       |

## PROFIL F Direction W-E

|                 |            |       |
|-----------------|------------|-------|
| 155- 155-       | 30/50 156- | 40/53 |
| 157- 53/51 158- | 38/54 159- | 44/56 |
| 160- 40/53 161- | 40/55 162- | 59/52 |
| 163- 72/50 164- | 55/51 165- | 62/52 |
| 166- 88/53 167- | 80/55      |       |

| PROFIL G Direction E-W |        |      |  | 168-   | 107/56 |
|------------------------|--------|------|--|--------|--------|
| 169-                   | 128/53 | 170- |  | 125/54 | 111/55 |
| 172-                   | 114/54 | 173- |  | 42/34  | 105/52 |
| 175-                   | 118/55 | 176- |  | 154/54 | 98/53  |
| 178-                   | 54/55  | 179- |  | 82/52  | 95/50  |

| PROFIL H Direction S-N |        |        |       |      |        |        |        |      |        |        |       |
|------------------------|--------|--------|-------|------|--------|--------|--------|------|--------|--------|-------|
| 100-                   | 198/50 | 148/57 | 81/58 | 101- | 228/44 | 184/51 | 111/55 | 102- | 161/40 | 144/46 | 93/55 |
| 103-                   | 143/45 | 114/53 | 53/63 | 104- | 140/45 | 119/55 | 70/55  | 115- | 95/47  | 80/57  | 39/59 |
| 106-                   | 135/47 | 92/54  | 59/55 | 107- | 144/44 | 119/55 | 78/54  | 108- | 137/45 | 110/54 | 73/53 |

| PROFIL I Direction S-N |        |        |        |      |        |       |        |      |        |        |        |
|------------------------|--------|--------|--------|------|--------|-------|--------|------|--------|--------|--------|
| 200-                   | 205/39 | 196/47 | 133/53 | 201- | 21/60  | 13/40 | 11/40  | 202- | 102/38 | 91/52  | 60/55  |
| 203-                   | 107/37 | 107/45 | 82/52  | 204- | 125/45 | 97/55 | 55/60  | 205- | 64/40  | 73/37  | 74/46  |
| 206-                   | 29/47  | 38/32  | 39/47  | 207- | 111/40 | 93/53 | 66/55  | 208- | 75/49  | 73/47  | 54/53  |
| 209-                   | 60/37  | 74/40  | 71/50  | 210- | 22/32  | 28/32 | 44/37  | 211- | 62/37  | 62/47  | 47/54  |
| 212-                   | 70/35  | 78/40  | 64/51  | 213- | 84/36  | 97/28 | 123/42 | 214- | 106/25 | 160/42 | 115/52 |
| 215-                   | 105/34 | 130/40 | 101/50 | 216- | 52/28  | 80/27 | 95/41  | 217- | 182/30 | 209/53 | 126/57 |

| PROFIL J Direction N-S |        |        |        |      |        |        |        |      |        |        |        |
|------------------------|--------|--------|--------|------|--------|--------|--------|------|--------|--------|--------|
| 127-                   | 25/42  | 37/ 5  |        | 128- | 49/36  | 63/38  | 67/50  | 129- | 23/51  | 55/10  | 75/43  |
| 130-                   | 60/37  | 90/35  | 91/47  | 141- | 137/45 | 128/46 | 113/50 | 132- | 83/47  | 85/45  | 71/51  |
| 133-                   | 133/47 | 115/51 | 82/53  | 134- | 167/44 | 150/50 | 117/54 | 135- | 172/47 | 170/50 | 121/55 |
| 136-                   | 156/45 | 123/50 | 104/45 | 137- | 254/40 | 220/40 | 151/55 | 138- | 183/40 | 211/45 | 143/55 |
| 139-                   | 175/35 | 209/43 | 141/54 | 140- | 157/38 | 181/45 | 122/55 |      |        |        |        |

| PROFIL K Direction W-E |       |        |       |      |       |       |      |  |  |  |       |
|------------------------|-------|--------|-------|------|-------|-------|------|--|--|--|-------|
| 109-                   | 50/53 | 110-   |       |      | 41/50 | 111-  |      |  |  |  | 84/52 |
| 112-                   | 92/55 | 113-   |       |      | 80/50 | 114-  |      |  |  |  | 70/52 |
| 115-                   | 55/51 | 116-   |       |      | 56/51 | 117-  |      |  |  |  | 25/37 |
| 118-                   | 93/35 | 109/40 | 97/50 | 119- |       | 48/45 | 120- |  |  |  | 75/48 |
| 121-                   |       | 91/52  | 122-  |      |       | 67/50 | 123- |  |  |  | 65/53 |
| 124-                   |       | 81/58  | 125-  |      |       | 82/55 |      |  |  |  |       |

| PROFIL L Direction N-S |       |       |        |      |        |        |        |      |       |        |        |
|------------------------|-------|-------|--------|------|--------|--------|--------|------|-------|--------|--------|
| 224-                   | 25/47 | 30/20 | 47/35  | 225- | 65/38  | 67/40  | 77/45  | 226- | 90/49 | 81/47  | 59/52  |
| 227-                   | 96/44 | 80/46 | 66/50  | 228- | 107/44 | 97/44  | 88/47  | 229- | 92/45 | 84/47  | 62/51  |
| 230-                   | 90/47 | 76/48 | 48/61  | 231- | 83/42  | 77/45  | 60/53  | 232- | 99/44 | 108/44 | 77/51  |
| 233-                   | 85/27 | 94/37 | 102/46 | 234- | 110/21 | 150/35 | 144/47 | 235- | 93/35 | 162/26 | 161/45 |

## MESURES PLURIDICTIONNELLES - FREQUENCES (F) EN KHz

| F    | 183    | 162    | 236    | 15.1   | 16     | 16.4   | 20.3   |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 6-   | 63/32  | 70/42  | 114/51 | 102/47 | 85/55  | 107/52 |        |
| 9-   | 193/42 | 242/47 | 132/53 | 115/55 | 135/57 | 139/52 |        |
| 10-  | 177/48 | 172/50 | 104/54 | 98/56  | 99/57  | 106/53 |        |
| 35-  | 194/47 | 165/51 | 108/51 | 120/51 |        | 112/51 |        |
| 37-  | 181/50 | 141/52 | 100/50 | 144/50 |        | 90/50  |        |
| 40-  | 253/47 | 204/50 | 190/44 | 190/45 |        |        |        |
| 41-  | 220/46 | 172/55 | 110/50 | 98/52  |        | 122/49 |        |
| 42-  | 324/46 | 262/51 | 155/50 | 188/48 |        |        |        |
| 49-  | 360/40 | 332/47 | 217/51 | 230/52 | 184/55 |        |        |
| 59-  | 91/44  | 83/46  | 65/51  | 47/48  | 60/55  |        |        |
| 64-  | 62/43  | 75/27  | 88/45  | 70/50  | 87/47  |        |        |
| 117- | 31/74  | 6/     | 6/     | 25/37  | 63/45  | 17/25  |        |
| 218- | 149/41 | 110/37 | 137/41 | 97/52  | 82/51  | 86/53  | 96/50  |
| 219- | 97/95  | 150/40 | 104/39 | 82/49  | 72/53  |        | 100/46 |
| 220- | 108/40 | 177/44 | 141/46 | 67/50  | 84/56  |        | 65/48  |
| 221- | 223/42 | 145/45 | 131/37 | 92/58  | 72/53  | 86/58  | 96/56  |
| 222- | 196/50 | 120/53 | 177/52 | 65/57  | 93/57  | 92/58  | 120/58 |
| 223- | 66/29  | 84/31  | 87/35  | 93/51  | 85/49  | 122/47 | 112/45 |

## BIBLIOGRAPHIE

- CADISCH, J., H. EUGSTER und E. WENK (1968). Geol. Atlas Schweiz, Blatt Scuol-Schuls-Tarasp. *Erläuterungen. Schweiz. Geol. Komm.*, 68 p.
- FISCHER, G., B. V. LEGUANG and I. MULLER (1983). VLF ground surveys a powerful tool for the study of shallow two dimensional structures. *Geophysical Prospecting*, 31, 977-991.
- KELLER, G. V. and F. C. FRISCHKNECHT (1979). Electrical methods in geophysical prospecting. Pergamon Press. Oxford.
- MULLER, I. (1983). Anisotropie properties of rocks detected with electromagnetic VLF (very low frequency) measurements. *International Symposium on field measurements in geomechanics*, Zürich, p. 273-282.
- MULLER, I., J. GIBERT et R. LAURENT (1984). Application des méthodes géophysiques, électromagnétique VLF (very low frequency) et microseismique à l'étude du karst de Dorvan Cleyzieu (Jura méridional, France). *Bulletin du Centre d'hydrogéologie de Neuchâtel*, n° 5, p. 145-162.
- SCHMASSMANN, H. (1984). Gutachten über den Gefahrenzonenplan im Gebiet Spinatscha. Las Mofetas, Gemeinde Scuol. Departement des Innern und der Volkswirtschaft Graubünden (non publié).
- SUPPE, J. (1985). Principles of structural geology. Prentice-Hall, Cop. 537 p.
- WEBER, E. und T. LARDELLI (1979). Vorbericht zu den Untersuchungen über die Möglichkeit zur Gewinnung von CO<sub>2</sub>-Gas bei Scuol/Schuls. Büro für Technische Geologie AG, Maienfeld, Schweiz. Non publié.
- WEXSTEEN, P. (1986). Geochemistry of cold and CO<sub>2</sub>-rich springs in the Alps of eastern Switzerland. Fifth international symposium on Water-Rock Interaction, Reykjavik, Iceland. *Proceedings*, p. 619.
- (1987). Hydrogéologie des sources minérales et gazeuses de la région de Scuol-Tarasp (Basse-Engadine, Grisons, Suisse). En préparation.

