Zeitschrift: Eclogae Geologicae Helvetiae

Herausgeber: Schweizerische Geologische Gesellschaft

Band: 73 (1980)

Heft: 3

Artikel: Localisation des zones fracturées dans le karst par la prospection géoélectrique et microsismique

Autor: Müller, Imre

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-164993

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: 13.07.2025

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

Eclogae geol. Helv.	Vol. 73/3	Pages 855–866	7 figures dans le texte	Bâle, novembre 1980

Localisation des zones fracturées dans le karst par la prospection géoélectrique et microsismique

Par IMRE MÜLLER[1])

RÉSUMÉ

La localisation exacte des zones fracturées et perméables est une condition indispensable pour implanter des forages d'eau productifs dans le karst. Les expériences, entreprises à l'aide de la géophysique, montrent que les mesures géoélectriques (tri-potentielles) et microsismiques permettent de détecter les anomalies dues à la fracturation et, par ce fait, pourraient avantageusement compléter l'analyse classique de la fracturation dans sa tâche difficile d'exploration de la perméabilité.

ZUSAMMENFASSUNG

Eine unerlässliche Bedingung zur erfolgreichen Wasserbohrung im Karst ist die Kenntnis der genauen örtlichen Lage zerklüfteter und wasserdurchlässiger Zonen. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen deutlich, dass es die geoelektrische (tripotentiale) Profilaufnahme und mikroseismische Sondierung erlauben, Anomalien aufzudecken, die eine Folge der Zerklüfung sind. In diesem Sinne könnten sie die klassischen Klüftungsanalysen ergänzen, um die schwierigen Probleme der Durchlässigkeitsuntersuchung zu lösen.

ABSTRACT

Precise localization of permeable fracture zones is a prerequisite for siting water-producing drillholes in a karst terrain. Geophysical prospection has shown that geoelectric (tri-potential) and micro-seismic surveying show up anomalies due to fracture zones. These methods may therefore be profitably used in addition to classical analysis of fracture patterns when investigating karst permeability.

1. Introduction

Dans le cadre du Programme National sur le Cycle de l'eau, l'étude des caractéristiques structurales et hydrodynamiques des aquifères karstiques par leurs réponses naturelles et provoquées, a été entreprise par le Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, par l'Institut de Géologie de l'Université de Fribourg et par l'Institut de Physique de l'Université de Berne.

L'approche indirecte des caractéristiques hydrogéologiques des réservoirs calcaires est motivée par la difficulté qu'on y rencontre dans la détermination directe de leurs caractères hydrogéologiques et, notamment, du champ des perméabilités. On admet généralement qu'il existe dans le karst un champ très étendu de faible perméabilité découpé en nombreux «blocs» par un réseau de drainage très perméa-

[1]) Centre d'Hydrogéologie, 11, rue Emile-Argand, 2007 Neuchâtel, et Institut de Géologie, Université de Fribourg, Pérolles, 1700 Fribourg.

ble. Si, pour l'estimation des faibles perméabilités, les méthodes devenues classiques dans les aquifères à porosité interstitielle restent plus ou moins valables (essais de pompage, essais Lugon), elles ne sont plus utilisables pour l'approximation de la perméabilité du réseau karstique.

Seules les estimations indirectes sont aptes à fournir des renseignements sur les propriétés hydrogéologiques du réseau. Elles sont basées sur:

— l'analyse de la fracturation du réservoir calcaire,
— l'analyse de l'hydrogramme des sources karstiques,
— l'analyse de la variabilité des paramètres isotopiques et physico-chimiques de l'eau en fonction d'événements hydrodynamiques.

Parmi ces trois types d'approche, la localisation exacte, sur le terrain, des zones particulièrement fracturées et perméables ne peut être envisagée que par l'analyse de la fracturation. Les paramètres de la fissuration sont mesurés sur des stations de mesures isolées, puis ils sont estimés indirectement entre les stations à l'aide de fonctions d'interpolations (Kiraly 1978). Les résultats ainsi obtenus sont très satisfaisants, mais selon Kiraly, «il persiste cependant de nombreuses difficultés dans la détermination des champs d'orientation, de la fréquence, de l'ouverture et de l'extension des fractures». Or l'exploitation, la gestion et la protection des aquifères karstiques nécessitent la connaissance concrète de la structure du réservoir dont l'hydrogéologue doit tout d'abord préciser les dimensions. Il devrait ensuite situer les «blocs» peu perméables dans leur contexte lithologique et tectonique et déterminer le mieux possible l'emplacement et l'orientation des zones très perméables, puisque c'est dans ces zones que les ouvrages de captage doivent être implantés.

Vu l'enjeu et les difficultés pratiques à surmonter, il n'est pas superflu ou inutile de compléter l'analyse de la fracturation par d'autres investigations susceptibles d'apporter des renseignements supplémentaires quant à la localisation des zones fracturées perméables et à la configuration des «blocs» peu perméables.

C'est dans ce but, et encouragés par les travaux de Grillot (1979), Forestier & Verez (1978) et Krulc (1971, 1978), que nous avons également entrepris l'étude hydrogéologique du karst par des méthodes géophysiques (Müller 1979). Inspirés par des études de Chapellier & Meyer de Stadelhofen (1979), qui avaient mis en évidence l'effet d'échelle des mesures géophysiques sur filon, nous avons abordé les zones fracturées du karst par des mesures géoélectriques et sismiques comme s'il s'agissait de filons affleurants. Le présent travail décrit quelques résultats obtenus dans le Jura vaudois et neuchâtelois.

2. Matériel utilisé et méthodes employées

Les instruments suivants ont été utilisés:

— Potentiomètre modèle PR1-A de l'Institut de Géophysique de l'Université de Lausanne,
— «Sismic timer» ES-1A de Nimbus Instrument, Californie,
— «Portable Facsimile Seismograph» FS-3 de Huntec Limited, Canada.

Pour la prospection géoélectrique, on emploie la technique dite «tri-potentiel», déjà proposée sur le karst par Kirk & Rauch (1977), car celle-ci met bien en

évidence une zone hétérogène à l'intérieur d'une station de mesure. L'anomalie due à cette zone y est détectée non seulement par les valeurs de la résistivité apparente (ρ), mais également par la résistivité résiduelle ($\Delta\%$). Celle-ci est calculée à partir de la différence entre les résistances (R) des trois mesures α, β et γ effectuées par un dispositif WENNER (fig. 1).

Si la résistivité était distribuée d'une manière homogène à l'intérieur de la station de mesure, la différence entre les trois résistances serait égale à zéro. Dans le cas contraire, un delta apparaît:

$$R_\alpha - R_\beta - R_\gamma = \Delta .$$

Il est normalisé par rapport à R_α et exprimé en pourcentage comme suit:

$$(\Delta / R_\alpha) \times 100 = \Delta\% .$$

La résistivité résiduelle est donc un test d'hétérogénéité qui, accompagné par des valeurs de la résistivité apparente ρ_α et ρ_γ (plus sensible que ρ_α), renseigne sur la nature de l'anomalie rencontrée. Sa valeur peut atteindre plusieurs centaines de pourcents si l'anomalie possède une résistivité très différente du milieu environnant. Une zone fracturée et karstifiée est repérée par une baisse sensible de la résistivité apparente et, selon son extension, par une augmentation plus ou moins importante de la résistivité résiduelle.

La sismique réfraction est utilisée pour effectuer des sondages «normal-inverse».

La vitesse de propagation de l'onde longitudinale étant très différente entre une zone fracturée et karstifiée (200–800 m/s) et un «bloc» compact de calcaire (3000–5000 m/s), les anomalies dues à la fracturation sont généralement bien détectées sur la dromochronique.

Dans les régions étudiées, les résultats des mesures géophysiques sont toujours comparés à ceux de la fissuration et aux données spéléologiques et géomorphologiques.

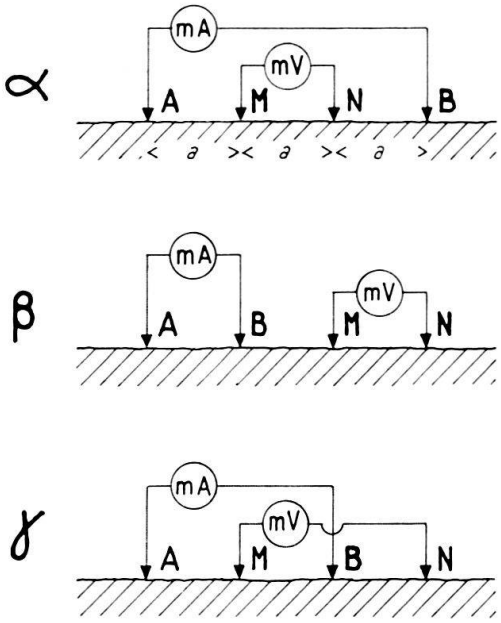

Fig. 1. Les trois configurations: α, β et γ du dispositif géoélectrique WENNER.

3. Prospections géophysiques

3.1 La région de la Grande Rolaz (Jura vaudois, coord. 567.700/157.400). Plan de situation n° 1, cf. fig. 2)

A l'extrémité nord de l'anticlinal du Mont Sallaz, les calcaires massifs de la dalle kimméridgienne forment une voûte très surbaissée. A la Grotte de la Grande Rolaz, ils sont orientés N30°-N40° avec un pendage de 5 à 10° vers le sud-est. La couverture quaternaire y est constituée par 5 à 20 cm de sol. La fissuration mesurée sur une falaise à une centaine de mètres au nord de la cavité ne tient compte que des fractures au moins décimétriques. La longueur du levé est de 34 m et suit les directions N110°-N120°.

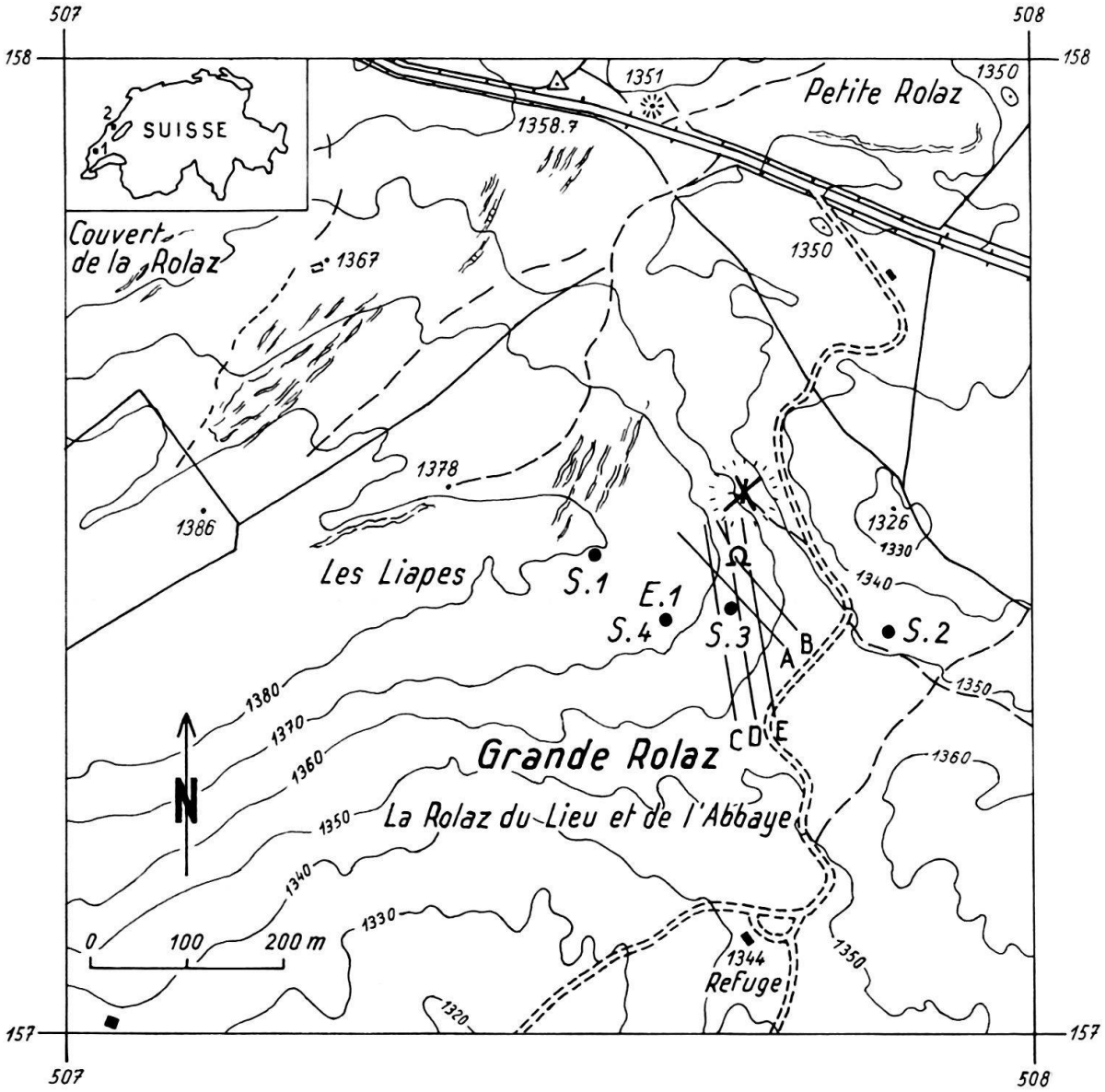

Fig. 2. La disposition des mesures géophysiques dans la région de la Grande Rolaz (plan de situation n° 1). (*S*.1 à *S*.4 = Stations sismiques pour tests de fissuration. *E*.1 = Station géoélectrique pour tests de fissuration. Profils *A*-*E*: profils géoélectriques et sondages sismiques).

Les trois systèmes principaux de fractures subverticales, dans l'ordre de fréquence estimé, sont les suivants (fig. 3):

— fractures de tension II: N 50° (perpendiculaires à la direction de la contrainte maximum σ_1),
— fractures de tension I: N 150° (parallèles à la direction de la contrainte principale σ_1),
— fractures engendrées par cisaillement sénestre: N 10°.

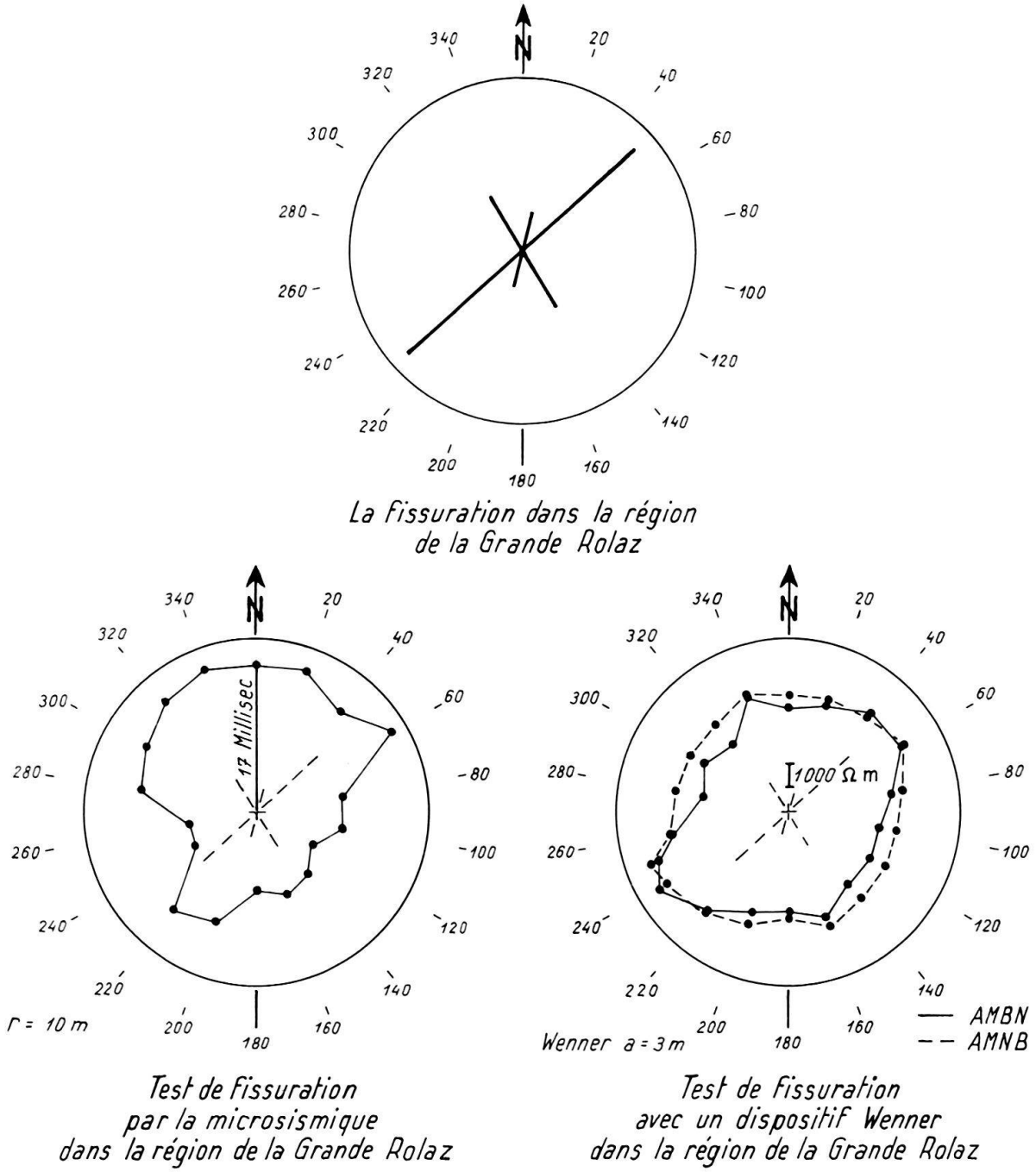

Fig. 3. Comparaison entre la fissuration mesurée sur affleurement et les tests de fissuration géoélectriques et sismiques (*S*.4 et *E*.1).

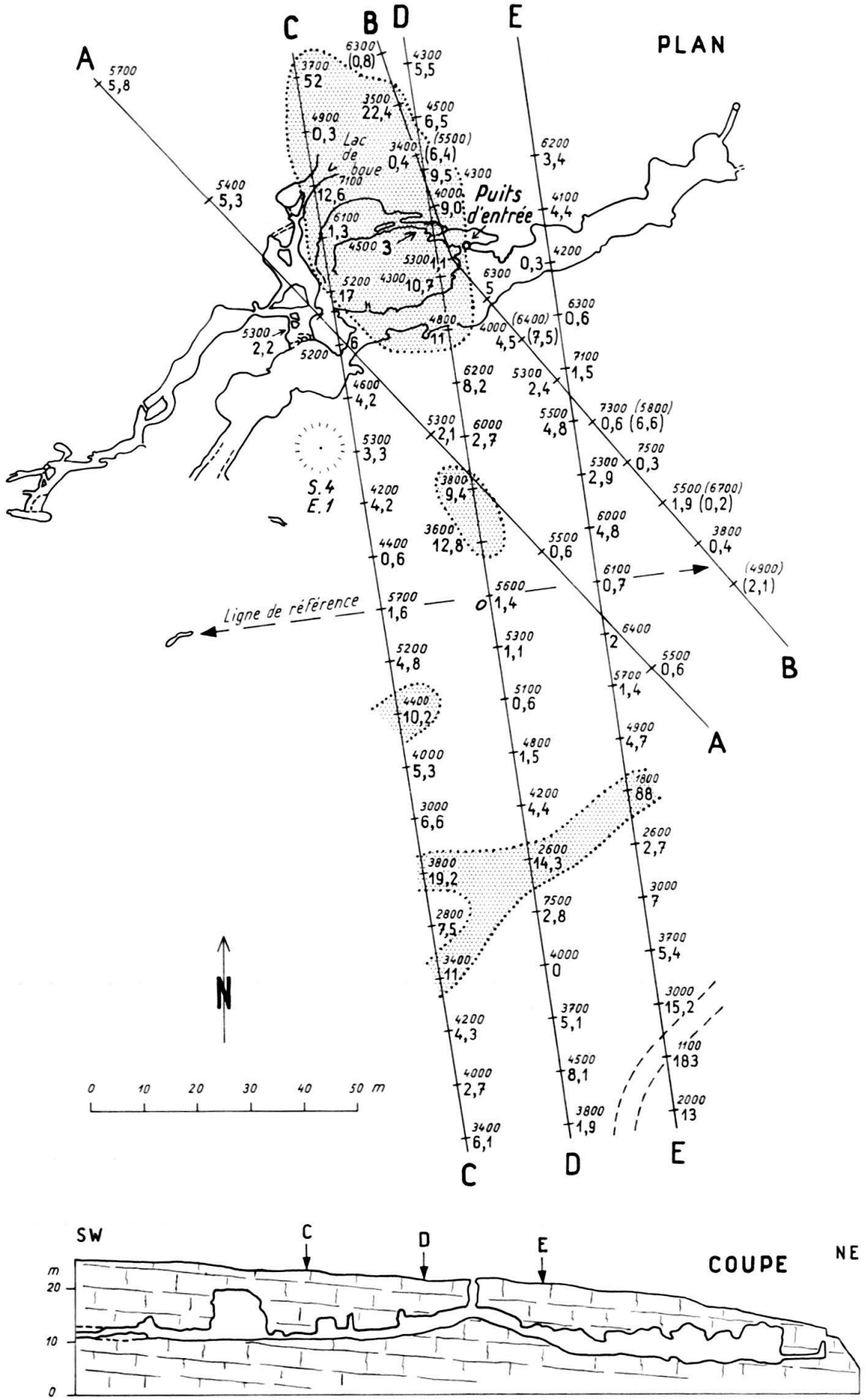

Fig. 4. Les valeurs de la résistivité apparente ρ_a dans la région de la Grotte de la Grande Rolaz. Petits caractères: ρ_a avec WENNER $AB = 15$ m; petits caractères entre parenthèses: ρ_a avec WENNER $AB = 30$ m; gros caractères: la résistivité résiduelle (Δ%).

L'emplacement de la station de mesure de la fissuration, les tests de fissuration par la microsismique (*S*.1 à *S*.4), les tests géoélectriques (*E*.1), ainsi que la disposition des profils de résistivités et des sondages sismiques (*A* à *E*) sont représentés par la figure 2.

La Grotte de la Grande Rolaz se développe principalement sur des fractures de tension II dans la direction N 50°-N 60°. Les mesures géophysiques exécutées par rapport à une ligne de référence fictive qui relie deux gouffres mettent en évidence plusieurs zones d'anomalies. Les mesures tri-potentielles (fig. 4 et 5) localisent assez bien les fractures responsables de la spéléogenèse par des $\Delta\%$ souvent supérieurs à

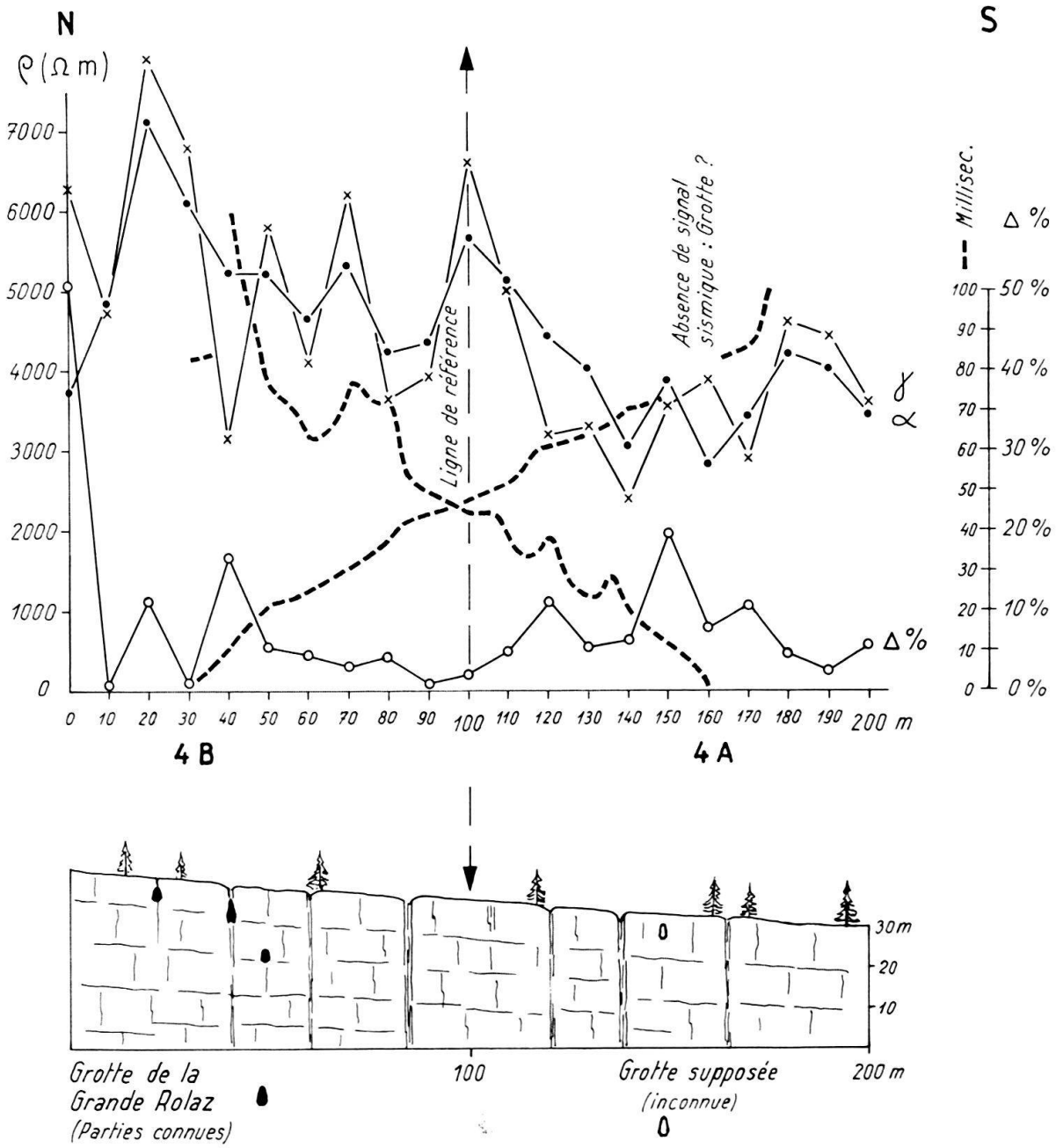

Fig. 5. Profil *C*: Les valeurs de la résistivité apparente ρ_a et ρ_γ, et de la résistivité résiduelle ($\Delta\%$) en comparaison avec le sondage sismique normal-inverse et l'interprétation schématique des mesures.

10. Les valeurs de la résistivité apparente sont surtout influencées par la profondeur de la cavité. Le dispositf WENNER, avec $AB = 15$ m, détecte le vide quand la cavité se développe à 2-3 m sous la surface, par l'augmentation sensible de la résistivité apparente. Tel est le cas pour le couloir «lac de boue» croisé par le profil *C* (fig. 4 et 5). Quand la cavité évolue en profondeur, ce même dispositif ne détecte que la zone fracturée et karstifiée qui surmonte la grotte, par la baisse sensible de la résistivité apparente (fig. 4, profil *E*). De même à 40-50 m au sud de la ligne de référence, une zone fracturée est détectée à la fois par les valeurs élevées de la résistivité résiduelle et les baisses sensibles de la résistivité apparente. L'orientation de cette zone est N 50°, c'est-à-dire celle de la spéléogenèse et par conséquent celle du drainage des eaux karstiques.

Les sondages microsismiques mettent bien en évidence les zones fracturées (fig. 5). On constate de nets ralentissements dans la propagation de l'onde longitudinale lors de la traversée de ces zones. Ces ralentissements, matérialisés par des bosses sur les dromochroniques, coïncident presque toujours avec la baisse de la résistivité apparente des profils géoélectriques.

Les tests de fissuration à l'aide de la géophysique donnent également des résultats intéressants. La figure 3 représente et compare entre elles, les données de la station de fissuration et celles de la microsismique *S*.4, ainsi que les données géoélectriques *E*.1. La fracturation qui régit la spéléogenèse apparaît nettement. La direction N 50°-N 60° est l'orientation des fractures ouvertes. Elle est caractérisée par une forte résistivité apparente et par la propagation lente de l'onde sismique.

3.2 La région du Prise Fège (Jura neuchâtelois, coord. 198.500/532.800. Plan de situation n° 2, cf. fig. 2)

Sur l'anticlinal de la forêt des Cornées-Les Fontenettes, dans la région du Prise Fège, les calcaires compacts du Malm forment des bancs épais, orientés N 50°-N 60°, avec un pendage de 10° à 15° vers le sud-est. Dans la Grotte de la Baume (coord. 199.100/532.740), un important miroir de faille attire l'attention sur l'existence d'un décrochement sénestre orienté N 10°.

Le but des mesures géophysiques était la localisation de cet accident par des profils géoélectriques et par des sondages sismiques et la confrontation de ces mesures avec les données spéléologiques et géomorphologiques. Les résultats sont récapitulés par la figure 7.

La fissuration mesurée en surface montre la prédominance des fractures N 10° dues au cisaillement sénestre. Les fractures de tension I sont moins fréquentes. Elles sont orientées N 140°. Les fractures de tension II, dirigées N 50°, sont très peu nombreuses.

Les tests de fissuration géoélectriques et sismiques (fig. 6) exécutés à une centaine de mètres à l'ouest de la Baume sont instructifs. La résistivité apparente accuse un minimum dans la direction du N 10°, et indique que la fracturation principale n'est pas karstifiée, du moins pas tout près de la surface. La microsismique, par contre, met en évidence la fracturation karstifiée: N 140°. En effet, c'est dans cette direction qu'on trouve l'alignement des dolines et le diaclase le plus long du Gouffre du Living (Topographie K. Stauffer, SCVT), découvert près de Prise Fège.

Les profils géoélectriques, exécutés avec le dispositif WENNER ($AB = 30$ m), et les sondages sismiques localisent bien la zone fracturée due au cisaillement N 10°. Le tracé de cet accident se fait également remarquer par des jalons dans la topographie. Un recul des courbes de niveau, orienté N-S, est nettement visible sur la partie la plus au sud de la carte (fig. 7).

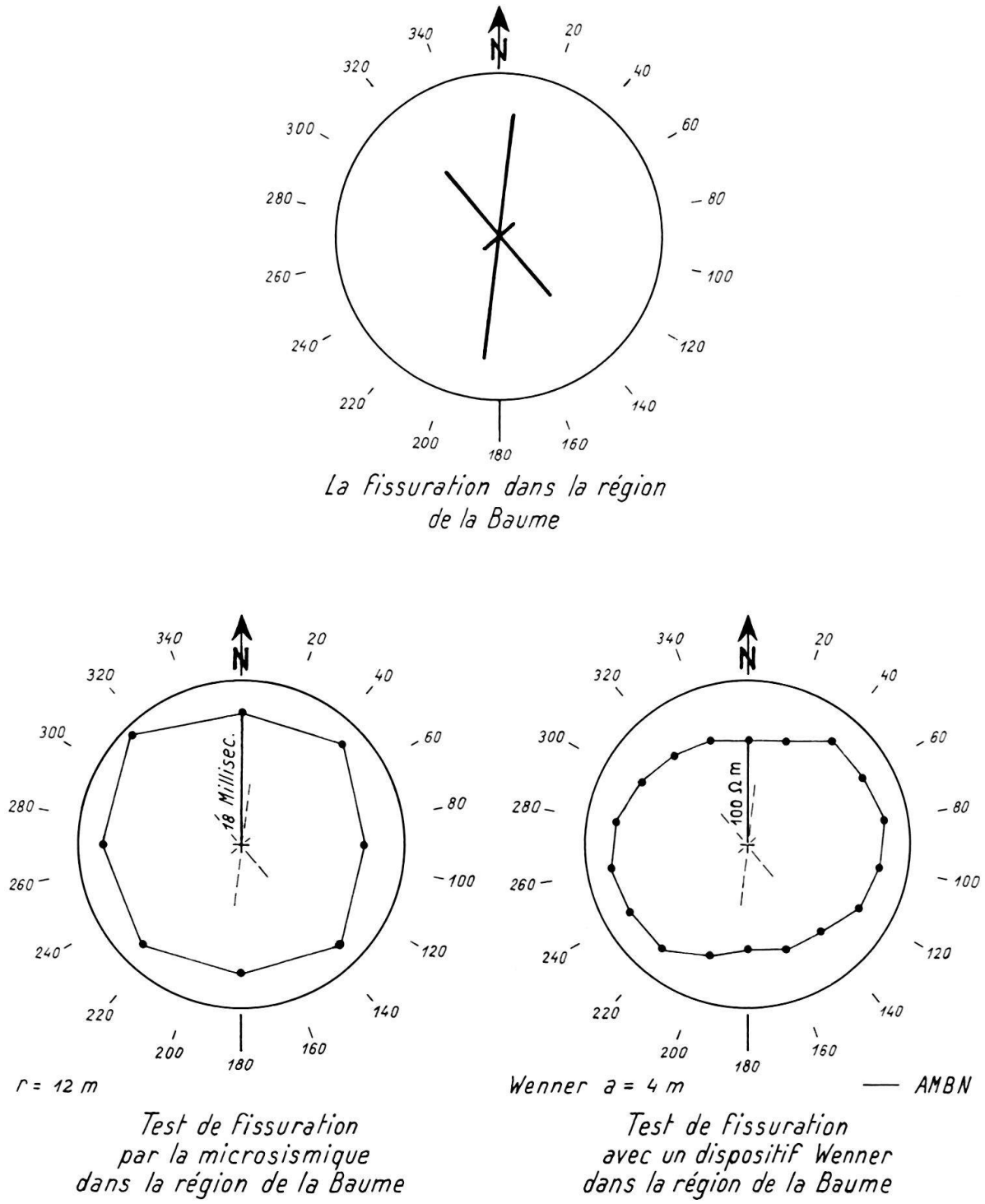

Fig. 6. Comparaison entre la fissuration mesurée sur les affleurements et le test de fissuration sismique et géoélectrique.

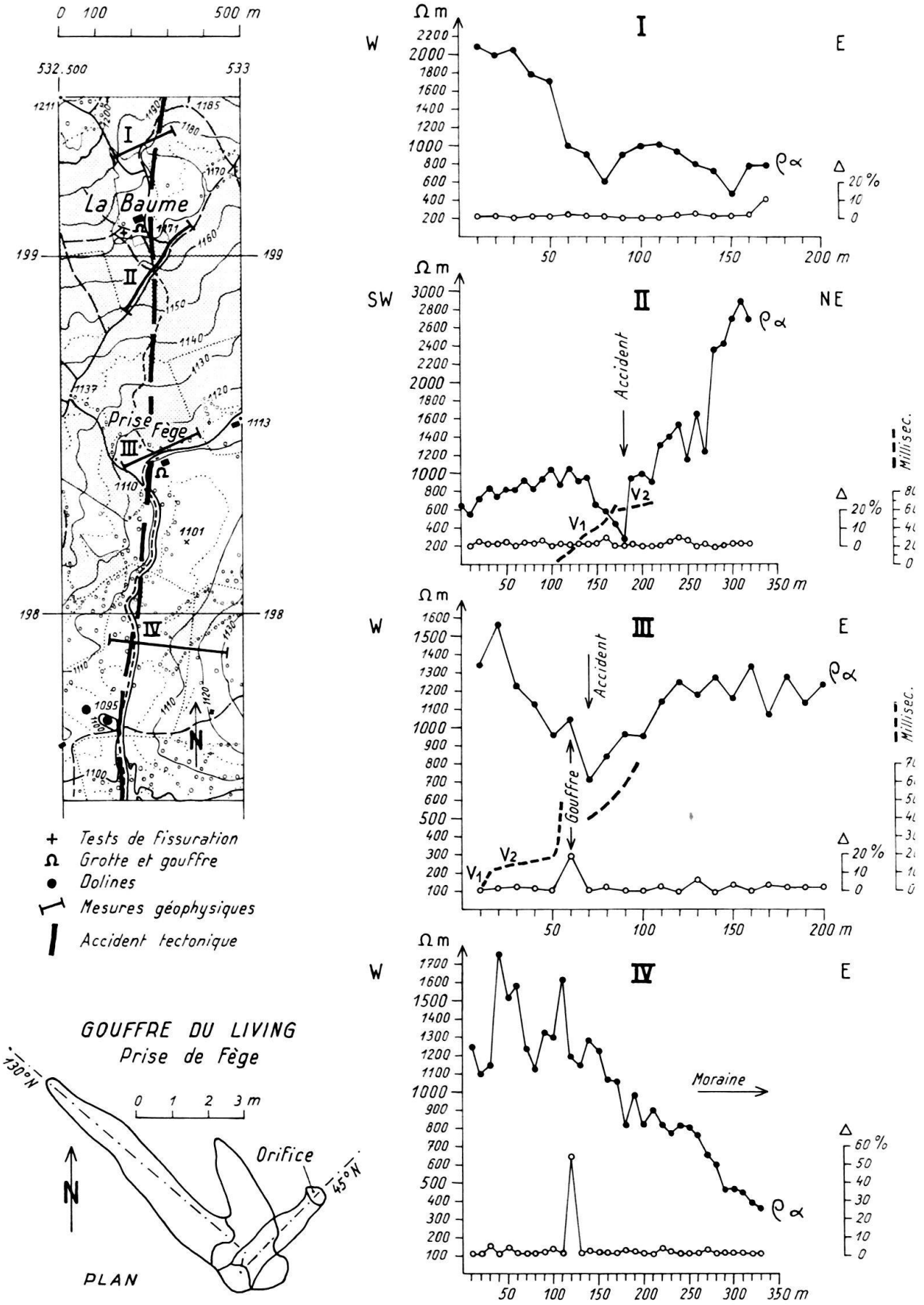

Fig. 7. Résultats des mesures géoélectriques (WENNER $AB = 30$ m) et micro-sismiques dans la région de la Baume et du Prise Fège (plan de situation n° 2, cf. fig. 2).

4. Discussion des résultats et conclusions

L'hétérogénéité de la perméabilité dans le karst est due essentiellement à la fracturation. Les zones particulièrement fissurées qui se développent sur de longues distances n'ont souvent qu'une extension latérale restreinte de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. Pour identifier ces zones par des mesures géophysiques, les longueurs des lignes d'investigations, surtout pour les mesures géoélectriques, ne doivent pas être trop importantes, sinon on risque d'homogénéiser le karst et de ne pas pouvoir mettre en évidence les zones d'anomalies liées à la fracturation. Or en limitant l'extension latérale des dispositifs de mesure, on limite également la profondeur d'investigation de la prospection. On peut alors se poser des questions sur la valeur des mesures géophysiques qui ne dépasseraient pas la profondeur de 5 à 20 m.

GRILLOT (1979) a mis en évidence, surtout par l'étude de la mine de bauxite de la Rouquette, qu'il existe une relation incontestable entre les relevés structuraux en surface et en profondeur. L'orientation des fractures reste uniforme en direction aussi bien sur de vastes zones qu'en profondeur. Il découle de cette étude que, dans une série carbonatée, tabulaire ou peu plissée, il est légitime d'extrapoler en profondeur les observations faites en surface.

La prospection géophysique du karst, même si elle est entreprise avec des dispositifs de mesures relativement courts, garde ainsi tout son intérêt.

L'analyse de la fracturation accompagnée par la prospection géoélectrique et microsismique, et complétée par les observations géomorphologiques et spéléologiques, devrait désormais aider l'hydrogéologue à circonscrire des zones favorables, dans le karst, à l'implantation de forages productifs.

Remerciements

L'auteur remercie les Professeurs C. Meyer de Stadelhofen et Mme D. Chapellier de l'Institut de Géophysique, Lausanne, pour leurs conseils scientifiques et techniques. Il exprime sa reconnaissance au Professeur A. Burger et au Dr L. Kiraly du Centre d'Hydrogéologie, Neuchâtel, pour les encouragements et discussions constructives. Les spéléologues enthousiastes de la SSS ont beaucoup aidé sur le terrain; le manuscrit a été corrigé et dactylographié par Mme Mauroux, les figures dessinées par M. Papaux, les résumés traduits par MM. P. Homewood, T. Ackermann et W. Winkler. A toutes ces personnes, l'auteur exprime ici sa gratitude.

Ces recherches font partie du Programme National sur le cycle de l'eau financé par le Fonds National Suisse pour la Recherche Scientifique, à qui l'auteur adresse ses vifs remerciements.

BIBLIOGRAPHIE

CHAPELLIER, D., & MEYER DE STADELHOFEN, C. (1979): *Mesures de résistivités sur filons.* - Bull. Inst. Géophys. appl. Univ. Lausanne *1*, 1-20.

FORESTIER, G., & VEREZ, C. (1978): *Etude de la fracturation du Plateau d'Ornans (Doubs).* - Thèse Univ. Franche-Comté, Besançon.

GRILLOT, J.C. (1979): *Structure des systèmes aquifères en milieu fissuré. Contribution méthodologique à cette connaissance.* - Thèse Univ. Sci. Techn. du Languedoc. Montpellier.

KIRALY, L. (1978): *La notion d'unité hydrogéologique. Essai de définition.* - Thèse Univ. Neuchâtel. Bull. Cent. Hydrogéol. Univ. Neuchâtel *2*, 83-216.

KIRK, K.G., & RAUCH, H. (1977): *The application of the tri-potential method of resistivity prospecting for groundwater exploration and land use planning in karst terrains.* - Karst Hydrogeol. AIH Mem. *12*, 285-299. UAH Press, Huntsville, Alabama.

KRULC, Z. (1971): *Einige Einsatzmöglichkeiten und praktische Ergebnisse der Geophysik bei der Erschliessung von Karst- und Thermalwässern.* - Geologie *20*/8, 862-875.

— (1978): *Geophysik in der Karst-Hydrogeologie.* - Steir. Beitr. Hydrogeol. *30*, 123-126.

MÜLLER, I. (1979): *Premiers essais micro-sismiques appliqués à l'étude hydrogéologique du karst jurassien.* - Bull. Cent. Hydrogéol. Univ. Neuchâtel *3*, 41-53.