Zeitschrift: Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles

Herausgeber: Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles

Band: 118 (1995)

Artikel: Réflexions sur les résultats obtenus par l'enregistrement en continu des paramètres géophysiques, électromagnetiques (VLF-EM) et magnétiques, pour l'exploration hydrogéologique des aquifères karstiques (Grotte de Milandre, Jura, Suisse)

Autor: Müller, Imre / Stiefelhagen, Wilhelm / Intchi, Roufai A. Mahaman

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-89432

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: 09.07.2025

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

RÉFLEXIONS SUR LES RÉSULTATS OBTENUS PAR L'ENREGISTREMENT EN CONTINU DES PARAMÈTRES GÉOPHYSIQUES, ÉLECTROMAGNETIQUES (VLF-EM) ET MAGNÉTIQUES, POUR L'EXPLORATION HYDROGÉOLOGIQUE DES AQUIFÈRES KARSTIQUES (GROTTE DE MILANDRE, JURA, SUISSE).

IMRE MÜLLER, WILHELM STIEFELHAGEN et ROUFAI A. MAHAMAN INTCHI

Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel. Rue Emile-Argand 11, 2000 Neuchâtel, Suisse.

Résumé

Dans la région de la Grotte de Milandre (Bure, JU), une faille régionale Nord-Sud, bien connue par des forages, est explorée par des méthodes géophysiques électromagnétiques VLF-EM (15-27 kHz) et par la prospection magnétique. Elle est bien détectée par cinq profils le long desquels les paramètres géophysiques sont enregistrés en continu et de façon expéditive. En effet, l'antenne motorisée du VLF-EM s'oriente automatiquement vers l'émetteur VLF choisi quand elle est montée sur le véhicule tout terrain et elle échantillonne en continu tous les paramètres de l'induction (Hs/Hp [%]) sans contact au sol. Les mesures sont réalisées à une vitesse de 10-15 km/h. L'équipement est destiné à la cartographie géophysique rapide et extensive dans le karst, pour repérer les zones fracturées perméables et pour localiser la position des failles avec précision. La prospection magnétique, mise en oeuvre avec succès, permet de relever, par un intervalle d'échantillonnage de 2 secondes, de faibles anomalies à l'aplomb des zones fracturées, produites par leur teneur en magnétite. Ces anomalies, même faibles, sont précieuses pour affiner l'interprétation des données géophysiques électromagnétiques.

Abstract

In the karstic area of the cave system of Milandre (Bure, Jura, Switzerland), electromagnetic VLF-EM (15-27 kHz) and magnetic experimental surveys were carried out to detect a regional North-South fault which had been previously determined by boreholes. This fault zone appears to be well localized on the five profiles along which geophysical parameters were continuously recorded in a simple and efficient manner. During this recording process, the VLF-EM antenna, mounted on a four wheel drive vehicle, is self orientated towards the selected VLF transmitting station by a motorized pilot mechanism, and record the overall induction parameters (relation of secondary to primary magnetic field : Hs/Hp ratio in %) without any ground contact requirement; the speed of the progression is 10 to 15 km/h. The equipment has been designed for rapid and extensive geophysical survey of karstic environments to image or accurately site permeable faults zones. A magnetic survey, with a sampling rate of 2 seconds, successfully picked up weak anomalies over

the fractured zones caused by a relatively high magnetite content. These anomalies, although weak, appear to be valuable for improving the interpretation of electromagnetic data.

Zusammenfassung

In der Umgebung der Grotte von Milandre (Bure, JU) wird eine durch zahlreiche Bohrungen bekannte Nordsüd verlaufende Verwerfung geophysikalisch mit Hilfe elektromagnetischer (VLF-EM, 15-27 kHz) und magnetischer Verfahren untersucht. Die Verwerfung ist klar in fünf Profilen erkennbar, auf denen Messdaten kontinuierlich im Laufschritt aufgenommen wurden. Insbesondere die an einem Geländewagen montierte automatische VLF-EM Antenne, die sich selbständig auf den gewählten VLF-Sender ausrichtet, erlaubt eine bodenkontaktlose kontinuierliche Aufnahme der magnetischen Induktion (Relation zwischen primärem und sekundärem Feld in %: Hs/Hp) mit einer Geschwindigkeit von etwa 10 bis 15 km/h. Die Messgeräte wurden für die schnelle und extensive geophysikalische Kartographie von Karstgebieten entwickelt; speziell für die Detektion permeabler geklüfteter Zonen und deren exakter Positionierung. Die Magnetometrie erlaubt mit einer Abtastrate von zwei Sekunden eine Lokalisierung auch schwacher magnetischer Anomalien, verursacht durch den erhöhten Magnetitgehalt geklüfteter Zonen. Eine kombinierte Auswertung der magnetischen und elektromagnetischen Daten erlaubt eine verfeinerte Interpretation zur besseren Lokalisierung geologischer Verwerfungen.

1. INTRODUCTION

Les hydrogéologues cherchent depuis toujours des techniques rapides et performantes pour localiser les zones fracturées perméables dans les aquifères fissurés. En pays calcaire, le succès des forages d'eau dépend essentiellement de la connaissance des paramètres de la fracturation et il n'est pas étonnant dès lors que diverses techniques géophysiques soient continuellement développées et expérimentées pour l'étude de la fissuration, pour la détection des accidents et pour la localisation des cavités karstiques. Récemment, cette recherche géophysique a été prise en compte également par les études d'impact et de vulnérabilité des aquifères karstiques, car la protection de nos réserves constitue une des préoccupations majeures de nos jours.

Le Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel participe activement, dès sa fondation, à l'étude et à l'exploration des aquifères karstiques et développe, depuis une quinzaine d'années déjà, des méthodes géophysiques électromagnétiques basées sur les propriétés des ondes VLF (Very Low Frequency 12 à 30 kHz). L'idée d'utiliser la géophysique électromagnétique dans les aquifères fissurés nous est venue de la prospection minière, où l'on utilise depuis longtemps des équipements VLF pour localiser les filons conducteurs, mais la sensibilité et la précision de ces instruments n'étaient de loin pas satisfaisantes pour la prospection hydrogéologique des réservoirs calcaires. Nous avons donc été amenés à élaborer nos propres instruments. Les résultats obtenus dans le karst tabulaire de l'Ajoie (Grotte de Milandre), par le premier prototype VLF-Résistivité, récepteur construit en 1980, ont été très encourageants (MÜLLER 1982). Cette technique de prospection électromagnétique qui utilise l'énergie diffusée par des antennes émettrices de radiocommunication lointaine (France, Angleterre, Russie, etc.), permet de mesurer la résistivité électrique de la roche de façon ponctuelle et jusqu'à des

profondeurs de plusieurs dizaines de mètres. L'exploration expéditive et pluridirectionnelle du milieu fissuré a donc débuté dans le karst jurassien (FISCHER *et al.* 1983).

L'instrumentation VLF-R a été ensuite perfectionnée pour pouvoir utiliser les fréquences de radio LF (Low Frequency 50 à 250 kHz) et avec le nouveau prototype, on mesure actuellement, avec une bonne précision, la résistivité (Ohm•m) et la phase (déphasage en degrés entre le champ électrique et magnétique) entre 12 et 240 kHz. La Radio-Magnéto-Tellurique (RMT) est née et, dès lors, il est devenu possible d'effectuer des sondages de fréquence en quelques secondes seulement et d'examiner les propriétés électriques du milieu à différentes profondeurs et dans différentes directions (THIERRIN & MÜLLER 1988). La technique RMT a été testée et très largement utilisée pour explorer le milieu karstique (TURBERG 1993), mais on s'est vite rendu compte qu'elle était aussi efficace pour étudier les propriétés hétérogènes des aquifères à porosité d'interstices (CARVALHO 1993, TURBERG *et al.* 1994, ROSSI *et al.* 1994).

Il nous manquait cependant des techniques de prospection en continu, sans contact au sol, nous permettant de mettre en évidence à l'échelle métrique, tous les changements latéraux dans les propriétés électriques de la roche. La présente publication informe sur le récent développement de notre instrumentation VLF et fait part de quelques résultats, comparés aux données de la prospection magnétique, et obtenus dans la région de la Grotte de Milandre (Bure, JU).

2. LE SITE EXPÉRIMENTAL DE BURE

La région de la Grotte de Milandre au Nord de Bure (JU) dans le karst tabulaire de l'Ajoie a été un terrain d'étude privilégié du Centre d'hydrogéologie dès les premières explorations (MÜLLER & VOUILLAMOZ 1979). La topographie de la cavité karstique, projetée sur la surface du sol, afin de faciliter les prospections, est très bien connue grâce aux spéléologues. L'existence d'une grande faille régionale est confirmée par la prospection RMT (TURBERG 1993) et vérifiée par plusieurs forages de reconnaissance. L'étude des tracés successifs de la future autoroute N16 a, elle aussi, beaucoup contribué à la connaissance géologique de la région, car 22 forages géotechniques ont été effectués dans les années 1990 -1992. Grâce à l'aide financière du FNSRS, certains de ces forages ont été approfondis pour devenir des forages hydrogéologiques. Le site de Bure est actuellement un véritable laboratoire en pleine nature, où des expériences hydrauliques dans les forages et des tracages des eaux karstiques en relation avec la rivière souterraine occupent plusieurs chercheurs. La figure 1 illustre la région, où cinq profils géophysiques ont été récemment effectués dans le but de tester les performances des nouvelles techniques de mesures en continu, capables de localiser la faille Nord-Sud sans contact au sol.

3. LA PROSPECTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE «EN CONTINU». LE VLF-EM(VERY LOW FREQUENCY - ELECTROMAGNETIC: 15 À 27 KHZ)

En se servant toujours de la même source d'énergie, c'est-à-dire de l'énergie des puissantes antennes émettrices VLF, il est possible de mesurer uniquement les effets inductifs qu'elles produisent dans la roche. La figure 2 illustre comment, selon la loi de l'induction, le champ primaire (Hp), qui émane de ces antennes VLF (Ep), va créer un petit courant électrique (J) dans les conducteurs, telles que les failles; ce courant engendre à son tour un champ magnétique secondaire (Hs), qui aura la même fréquence que le champ primaire, mais il sera déphasé par rapport à celui-ci. Le composant vertical de ce champ secon-

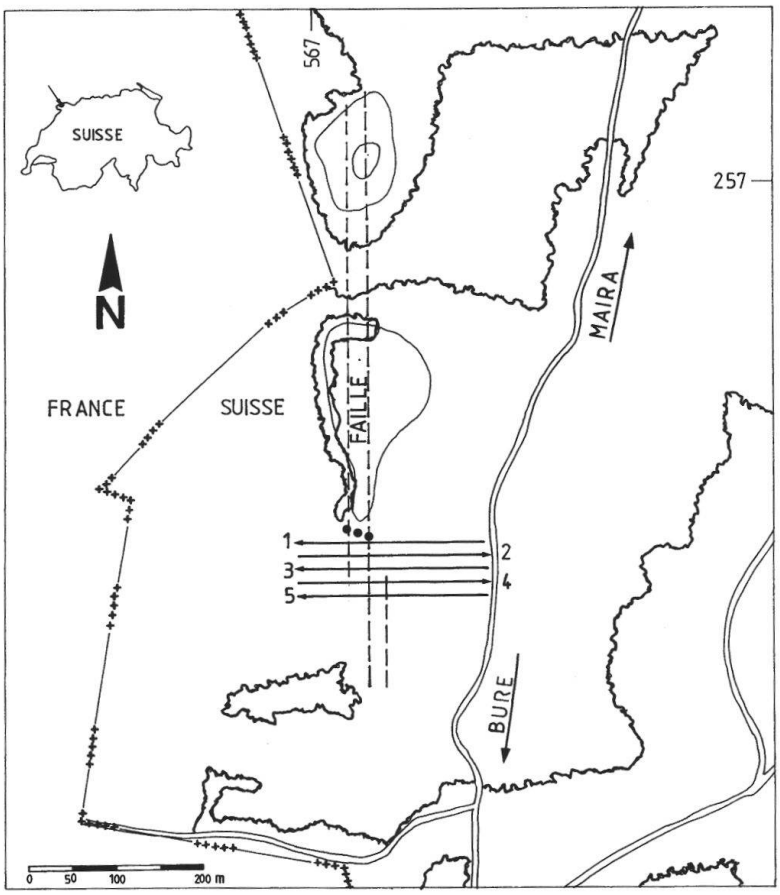

Fig.l: Plan de situation du site expérimental de Bure illustrant la position de la faille régionale N-S et les cinq profils VLF-EM et magnétiques. Forages de reconnaissances : •

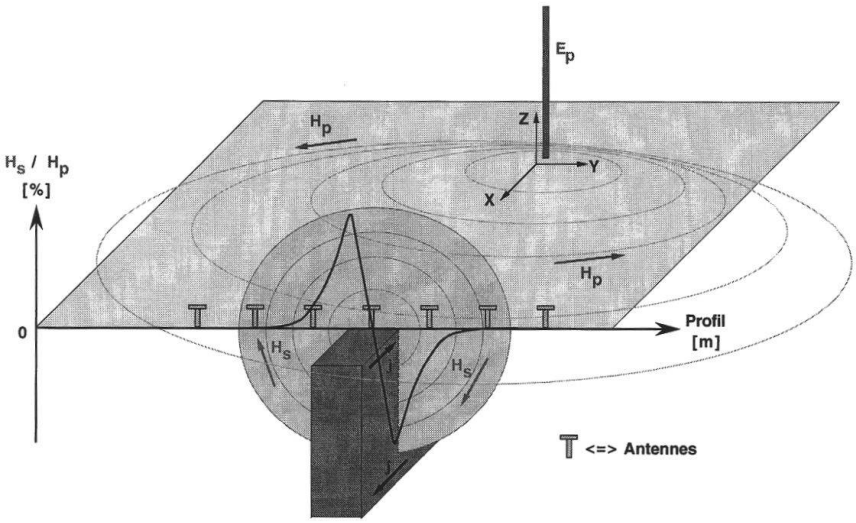

Fig.2 Illustration schématique de l'induction électromagnétique due à un émetteur VLF dans une faille. Ep = Antenne VLF émettrice. Hp = champ primaire. Hs = champ secondaire. J=Courant Foucault. Antennes = Bobines réceptrices du champ primaire (axe horizontal) et du champ secondaire (axe vertical). (Modifié d'après TURBERG & MÜLLER 1992).

daire est détectable par une bobine à axe vertical. Son intensité sera comparée en pourcentage à l'intensité du champ primaire VLF, mesuré simultanément par une bobine à axe horizontal. Les deux antennes orthogonales sur la figure 2 représentent cet dispositif de mesure. Ainsi les composants en phase (inphase) et en quadrature (outphase) du champ secondaire sont-ils détectés continuellement et exprimés en pourcentage du champ primaire (Hs/Hp [%]). En déplaçant lentement et continuellement ces deux antennes et le récepteur VLF le long des profils, il est possible de détecter la présence des conducteurs, les failles et les fractures rendues conductrices par leur remplissage d'argile humide, par l'apparition du champ magnétique secondaire qu'elles engendrent. La figure 2 illustre la courbe caractéristique théorique lors du passage d'une faille. Ces mesures sont continues et ne nécessitent aucun contact au sol. Elles permettent de détecter tous les changements latéraux dans les propriétés électriques des roches. Un premier prototype VLF-EM, construit en 1990, a révélé l'importance de ces mesures pour la prospection et la compréhension de la structure du milieu fissuré (TURBERG & MÜLLER 1992, KOHLBECK *et al.* 1993). L'instrument était encore porté à pied et la position correcte de ses antennes réceptrices contrôlée manuellement. En effet, si le champ primaire ne pénètre pas correctement dans la bobine à axe horizontal, les mesures sont faussées. Pour pouvoir «motoriser» le système et le monter sur une voiture, il fallait construire un deuxième récepteur VLF dont le rôle exclusif était d'optimaliser la réception du champ primaire et d'assurer à tout moment la position correcte de l'antenne de réception, même quand la voiture prend des virages. Ce dispositif est illustré par la figure 3a. On y voit l'antenne automatique fixée derrière une voiture tout terrain. Par terre, de gauche à droite, sont exposés le récepteur VLF, destiné à desservir l'antenne automatique à l'aide d'un moteur électrique, le récepteur VLF-EM pour mesurer les paramètres des champs magnétiques (Hs/Hp [%]), le datalogger, pour mémoriser les données et l'ordinateur portable pour visualiser les résultats. Des équipements semblables, mais aéroportés, existent depuis les années 1970 au Canada pour la prospection minière, mais la localisation précise des accidents et l'analyse détaillée de la fracturation ne peuvent être réalisées qu'avec des antennes à ras du sol et grâce à une électronique de pointe, capable de mesurer 0.1% de changement dans le rapport Hs/Hp. Un grand pas a donc été franchi avec l'arrivée de l'antenne automatique dans l'exploration motorisée et «en continu» du milieu fissuré, sans contact au sol.

4. LA PROSPECTION MAGNÉTIQUE

L'acquisition récente d'un magnétomètre à proton, l'ENVIMAG de la Société Scintrex (Canada), destiné à mesurer l'intensité du champ magnétique terrestre avec un temps d'échantillonnage rapide, nous a incité à faire un essai comparatif le long des mêmes profils que ceux empruntés par la prospection VLF-EM. Les paramètres prospectés par les deux méthodes sont tout à fait différents, mais ce qui rend les deux prospections quelque peu comparables c'est qu'elles se déroulent en continu et ne nécessitent aucun contact au sol. Il était donc raisonnable d'espérer qu'en cas d'un résultat, même partiellement utilisable, l'interprétabilité réciproque des paramètres soit améliorée par cette approche pluridisciplinaire.

La prospection magnétique est la plus ancienne des méthodes utilisées en géophysique. Elle est fondée sur l'analyse des anomalies magnétiques, lesquelles sont des distorsions locales du champ magnétique terrestre. Ces anomalies sont provoquées par la présence, dans la roche, de corps aimantables, telle la présence de certains

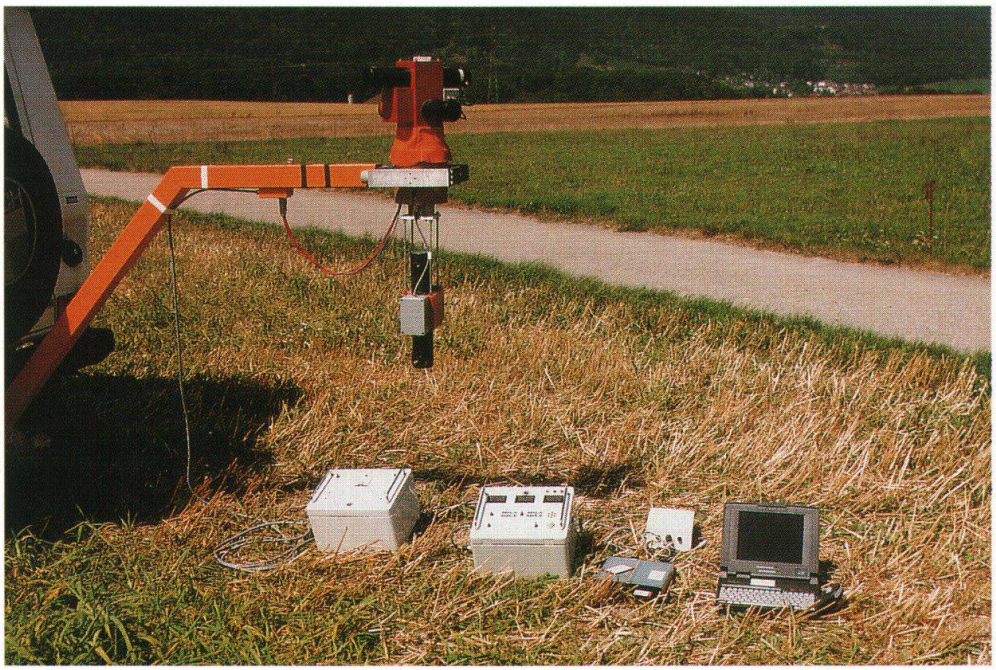

Fig.3a: Photographie illustrant le dispositif de mesure VLF-EM motorisé, avec l'antenne automatique, la télécommande de l'antenne, l'instrument pour mesurer les paramètres VLF (Hs/Hp [%]), le datalogger et l'ordinateur portable.

Fig.3b: Photographie illustrant le magnétomètre à proton ENVIMAG (Scintrex), avec ses deux capteurs pour la mesure du champ total (nT) et le gradient (nT/m).

minéraux, la magnétite et l'ilménite. La valeur du champ magnétique terrestre n'est pas constante dans le temps. Elle connaît de faibles variations journalières dont il faut tenir compte pour les mesures. L'unité utilisée pour mesurer l'intensité du champ total est le nanotesla (nT). Sa valeur est 30 000 nT à l'équateur et 60 000 nT aux pôles. En Suisse, elle est proche du 47 000 nT. L'intensité d'aimantation que prennent les minéraux et les roches sous l'effet du champ magnétique terrestre est une propriété fondamentale qu'on appelle: la susceptibilité magnétique (K). Elle est mesurée par des instruments appelés kappamètres. Nous rappelons quelques valeurs de susceptibilité, exprimées en SI (Système International) et dont les écarts peuvent être considérables (d'après MILSOM 1992).

Schistes	0.000 - 0.002
Grès	0.0005 - 0.001
Sels	0.000 - 0.001
Calcaires	0.00001 - 0.0001
Basaltes	0.001 - 0.1
Gabbros	0.001 - 0.1
Magnétite	0.1 - 20.0
Pyrrhotite	0.001 - 1.0

En examinant ces valeurs, on comprend tout de suite que la prospection magnétique ne sera pas très utile dans les roches sédimentaires, tels que les calcaires, car il n'existe pas de corps «perturbateur» aimanté pour générer des anomalies magnétiques. On pouvait craindre que les valeurs mesurées ne reflètent que celles du champ total terrestre et ne contiennent aucun renseignement sur la structure locale du milieu karstique. Il existe cependant dans les argiles de décalcification et dans les sédiments éoliens qui colmatent partiellement les zones fracturées, une petite fraction de magnétite capable de fournir une faible anomalie. Les débris de roches, les «cuttings», récupérés dans les trois sondages de reconnaissance implantés sur la faille (fig.1), ont été examinés avec le kappamètre KT-5 de la Société GEOPHYSIKA (Brno, République tchèque) et des valeurs «élevées» de susceptibilité magnétique ont été trouvées dans les parties colmatées de la faille. On a mesuré couramment des valeurs de K = 0.4 - 0.7 X 10E-3 SI, c'est-à-dire beaucoup plus que sur des calcaires, où les valeurs ne dépassent pas le 1 X 10E-5 SI. On pouvait donc s'attendre à trouver de faibles anomalies avec le magnétomètre à proton ENVIMAG, (fig 3b) dont la précision est de l'ordre de 1 nT avec une sensibilité de 0.1 nT au pas d'échantillonnage par intervalles 2 secondes. L'instrument mesure également le gradient (nT/m) et possède une mémoire étendue pour garder les données mesurées. Il a été utilisé par un opérateur à pied, qui parcourait lentement et régulièrement les cinq profils.

5. COMPARAISON ET DISCUSSION DES RÉSULTATS ÉLECTROMAGNÉTIQUES ET MAGNÉTIQUES

Les enregistrements des paramètres, VLF-EM (outphase %) et magnétique (nT), sont présentés à la figure 4. La vitesse d'acquisition des données était d'environ 10 km/h pour le VLF monté sur le véhicule tout terrain et de 2 km/h pour le magnétomètre à proton. Les profils VLF-EM ont été enregistrés par l'intermédiaire de l'émetteur 16.0 kHz, situé en Angleterre, orienté N 150° (degrés) par rapport au site de Bure. Seul le composant en quadrature (outphase) est montré ici, parce qu'il représente le paramètre qui est le moins influencé par les erreurs dues à la mauvaise tenue de la bobine à axe vertical, qui doit mesurer les composants du champ secondaire. On constate que le conducteur, c'est-à-dire la faille, a provoqué un champ secondaire important, car les courbes descendent à des valeurs de -20%. Pour mieux interpréter les profils et pour traduire les profils mesurés en profils de gradient, nous avons

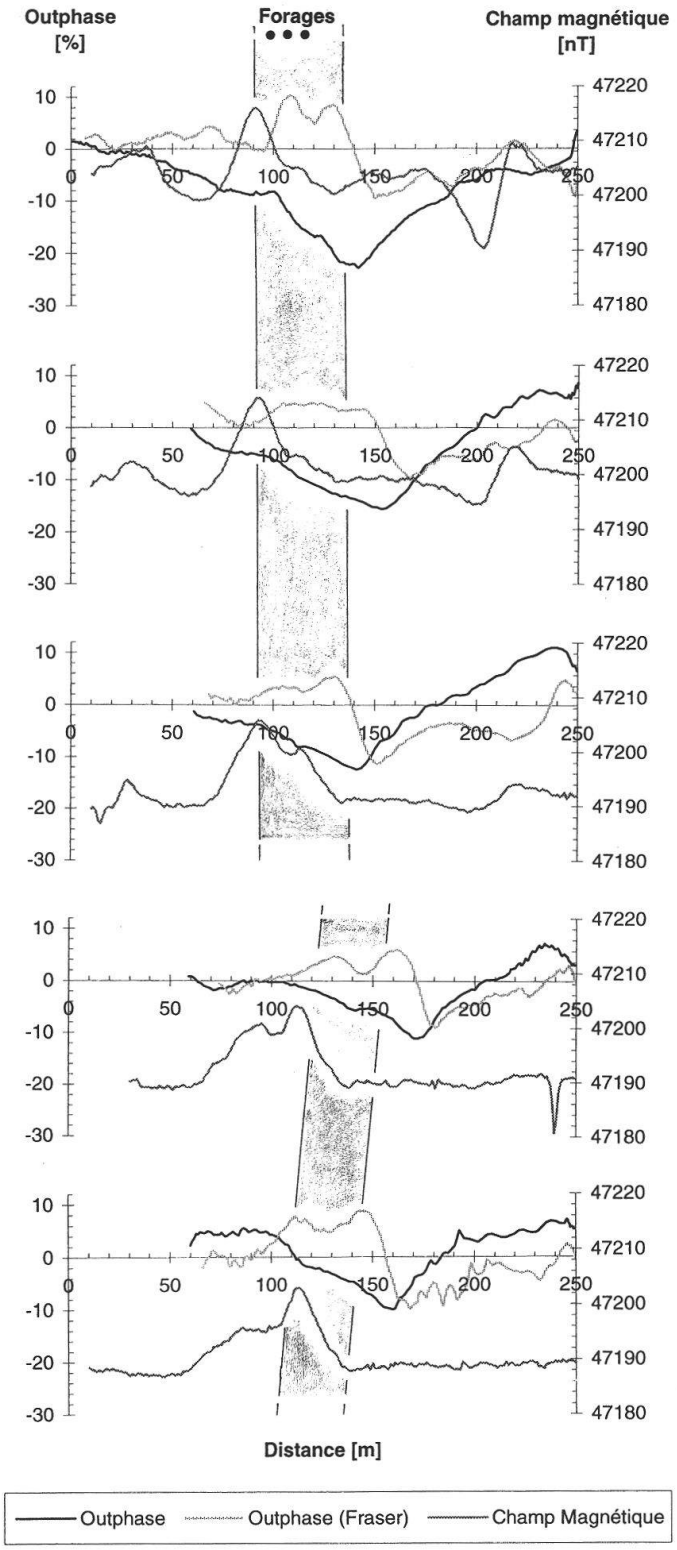

Fig.4: Illustration des données mesurées le long des cinq profils VLF-EM: Outphase [%], les résultats par filtrage Fraser; les anomalies magnétiques, [nT]; et la position de la faille.

utilisé le filtre Fraser (FRASER 1969). Ce filtrage mathématique, très simple, facilite la lecture des résultats et montre dans le cas présent l'existence de deux pics sur chacun des profils, que nous interprétons comme étant les deux bordures d'un couloir de broyage qui constitue la faille. On constate également que le «couloir» ainsi mis en évidence est décalé vers l'Est à partir du troisième profil. Il s'agit probablement d'un décrochement dû à un autre accident orienté Est-Ouest.

Etant donné que les réalités géologiques sont toujours beaucoup plus compliquées que les modèles, généralement simplistes, tels que représentés à la figure 2, les «réponses» VLF-EM ne sont pas toujours univoques et ne sont pas faciles à analyser en détail. Il est désormais important de se rendre compte qu'une faille constitue une hétérogénéité fort complexe dans l'espace, avec des contours parfois flous dans les trois dimensions, et qu'elle engendre des zones de broyage dont la nature et l'intensité peuvent varier progressivement sur son tracé. La géophysique ne peut évidemment pas analyser toutes ces finesses dans le détail. Dans le cas présent, il n'est pas possible de dessiner les contours exacts de l'accident sans ambiguïté. Aussi des méthodes complémentaires sont-elles utiles, voire indispensables si l'on désire implanter des forages d'eau avec un maximum de chance de succès.

Les profils magnétiques, enregistrés le long des cinq profils, montrent de faibles amplitudes, mais sont particulièrement cohérents avec les données VLF. Le remplissage argileux dans le couloir de broyage de la faille Nord-Sud provoque une augmentation du champ magnétique, probablement due à sa teneur en magnétite. Ces anomalies sont bien alignées Nord-Sud sur les trois premiers profils, puis, semblablement aux données VLF, elles sont décalées vers l'Est sur les deux derniers profils. Ici aussi une remarque importante s'impose. L'anomalie magnétique dépend de la forme et de la position de l'objet dans l'espace et de son état de polarisation magnétique sous l'effet du champ magnétique terrestre. L'objet recherché ne se trouve donc pas obligatoirement à l'aplomb des valeurs extrêmes de minimum ou de maximum des courbes enregistrées, mais parfois bien entre les deux. Nous pensons que, dans le cas présent, la position de la faille correspondrait plutôt à cette dernière situation, à savoir que l'accident se trouverait entre les deux valeurs extrêmes de la courbe de l'anomalie magnétique. On s'aperçoit que, si l'on veut interpréter des subtilités, il suffit d'examiner comment les petits «épaulements», qui se forment sur le flanc Est de l'anomalie principale des trois premiers profils, vont grandir et, sous l'effet de la faille transversale, se transformer en anomalie principale sur les deux derniers profils. On y voit comment la faille Nord-Sud est décalée vers l'Est. Il existe donc une bonne cohérence entre les données obtenues par ces deux méthodes géophysiques différentes (magnétique et électromagnétique) qui, par ce biais de complémentarité, assurent une plus grande sécurité dans l'interprétabilité des résultats.

6. CONCLUSIONS

Les récents progrès de la prospection géophysique électromagnétique VLF-EM, grâce à une antenne de réception devenue automatique et opérant depuis un véhicule en déplacement, rendent l'exploration du milieu karstique particulièrement expéditive et de ce fait, permettent une prospection très attractive pour les hydrogéologues. En effet, si les conditions topographiques l'autorisent, la cartographie extensive des paramètres géophysiques, obtenue très rapidement sur de grandes surfaces, renseigne les hydrogéologues sur la nature et sur l'extension des zones particulièrement fracturées et perméables dans les roches fissurées. La méthode sera, sans

doute, particulièrement utile dans les grandes plaines des zones arides et semi-arides d'Afrique et d'Asie, où l'on aimerait localiser les accidents dans le socle fissuré proche de la surface. En effet, la méthode est malheureusement limitée, par manque de pénétration en profondeur, par la présence d'une couverture conductrice importante. Elle est perturbée par la proximité des lignes à haute tension et par les conduits métalliques enterrés. Dans les régions où la géologie et la tectonique sont mal connues, où les structures sont compliquées, l'interprétation des paramètres VLF-EM seuls n'est pas toujours univoque et nécessite un complément d'information par d'autres méthodes géophysiques. C'est dans ces situations que la prospection magnétique, opérant sans contact au sol, devient un complément très utile. Comme on a pu le constater sur le site expérimental de Bure, elle peut apporter un complément d'information utile à la compréhension des structures tectoniques. Evidemment, la Radio-Magnéto-Tellurique (RMT) et d'autres méthodes plus lentes ou plus onéreuses vont être parfois indispensables pour placer les forages d'eau dans un contexte géologique compliqué.

Actuellement, l'effort est porté sur l'interprétation quantitative des paramètres électromagnétiques par la modélisation 2D et 3D, afin de mieux tirer profit de ces méthodes performantes et très prometteuses pour l'exploration des aquifères fissurés.

REMERCIEMENTS

Les auteurs expriment leur reconnaissance à M.J. Duperrex pour la construction du matériel géophysique électromagnétique. Ils remercient MM. G. Fischer et P. Schnegg pour les conseils scientifiques et les discussions constructives. Ces recherches sont financées par le Fonds National Suisse pour la Recherche Scientifique (Requête no 21-36615.92) à qui les auteurs adressent leurs vifs remerciements.

BIBLIOGRAPHIE

CARVALHO DILL, A. 1993. Spatial variability in porous aquifer properties. Synthetical approach by geophysics, tracer techniques and groundwater flow parameter. *Thèse Univ. Neuchâtel.*

FISCHER, G., LE QUANG, B.V. & MÜLLER, I. 1983. VLF ground survey, a powerful tool for the study of shallow two-dimensional structures. *Geophysical Prospecting*, 31 : 977-991.

FRASER, D. C. 1969. Contouring of VLF-EM data. *Geophysics* 33 : 958-967.

KOHLBECK, F., SZARKA, L., STEINER, T., HOLLO, L. & MÜLLER, I. 1993. Lake-Bottom Geoelectric and Water-Born VLF Measurements on the lake Ferto (Neusiedlersee). *Expanded abstracts. 55th annual meeting of the European Association of Exploration Geophysicists (EAEG)*, Stavanger. DO 51.

MILSOM, J. 1992. Field geophysics. Geological Society of London Handbook. *John Wiley & Sons. New York.*

MÜLLER, I. & VOUILLAMOZ, P. 1979. Prospection sismique et spéléologie. Grotte de Milandre 1978. *Cavernes* (Bull. Sect. neuchâtel. Soc. suisse Spéléologie) 79/1 : 9-16.

MÜLLER, I. 1982. Première prospection électromagnétique VLF (Very Low Frequency) dans le karst en Suisse. *Actes Cong. natl. Spéléologie*, 24-26 sept. 1982, *Schwyz* : 173-181.

ROSSI, P., CARVALHO-DILL, A., MÜLLER, I. & ARAGNO, M. 1994. Comparative tracing experiments in a porous aquifer using bacteriophages and fluorescent dye on a test field located at Wilerwald (Switzerland) and simultaneously surveyed in detail on a local scale by radio-magneto-tellury (12-240 kHz). - *Environmental Geol.* 23 : 192-200.

THIERRIN, J. & MÜLLER, I. 1988. La méthode VLF-Résistivité multifréquence, un exemple d'exploration hydrogéologique dans un synclinal crétacé à la Brévine (Jura neuchâtelois). - Quatrième Coll. Hydrol. en Pays calcaire et en milieu fissuré, Besançon, 29.9-1.10.1988, *Ann. sci. Univ. Besançon*, Mém. H.S. 6 : 17-24.

TURBERG, P. & MÜLLER, I. 1992. La méthode inductive VLF-EM pour la prospection hydrogéologique en continu du milieu fissuré. *Ann. sci. Univ. Besançon*, Mém. H.S. 11 : 207-214.

TURBERG, P. 1993. Apport de la cartographie magnétotellurique à l'hydrogéologie des milieux fracturés. *Thèse Univ. Neuchâtel.*

TURBERG, P., MÜLLER, I. & FLURY, F. 1994. Hydrogeological investigation of porous environments by radio magnetotelluric-resistivity (RMT-R 12-240 kHz). - *J. Applied Geophys.* 31 : 133- 143.