

Apport de l'audio-magnétotellurique à la connaissance du socle fissuré du Cézallier

M. Aucelet*, H. Fabriol**

Mots clés : Sondage géophysique, Méthode audiomagnétotellurique, Socle, Milieu fissuré, Modèle 2 dimensions, Modèle 3 dimensions Puy-de-Dôme, Cantal, Haute-Loire (Cézallier)

Résumé

La prospection audio-magnétotellurique du socle du Cézallier a fourni une aide à la cartographie régionale, et, par la détection d'anomalies conductrices, à la compréhension des circulations hydrothermales en milieu de socle fissuré.

Sur la totalité de la région étudiée, elle a confirmé les limites géologiques des formations autochtones et allochtones et reconnu les grandes limites tectoniques N-S et E-W des ensembles de terrain caractérisés par des spécificités géochimiques en relation avec les différents groupes d'émergence.

Sur la zone Chassolle-Zagat, la modélisation 2D a montré l'existence d'un grand axe conducteur N.NE-S.SW, qui correspond à une direction de fracturation régionale. De même des niveaux conducteurs ponctuels ont été mis en évidence à l'aplomb des émergences. Ils sont en relation avec l'alimentation des sources et montrent que l'ascension des fluides se fait par des plans de faille très redressés.

L'utilisation de l'audio-magnétotellurique pour ce type de prospection, même si elle n'a pas apporté les résultats attendus (suivre en profondeur les réseaux alimentant ces émergences), a montré sa validité en milieu fissuré. Il n'existe pas de réservoir géothermal de grande extension dans le socle du Cézallier, ce qui a été confirmé par le forage de Chassolle. Par contre, une modélisation 3D sommaire apporte des indications sur les zones pouvant constituer des drains potentiels pour les fluides circulant dans le sous-sol.

Abstract

Contribution of the audio-magnetotelluric method to the knowledge of the fractured basement of the Cézallier

An audio-magnetotelluric survey has been carried out in the Cézallier (Massif Central, France), initially focused on the exploration of possible geothermal reservoirs, hypothesis based on the vicinity of recent volcanism and mineral springs.

Due to the complexity of the geological structures it was difficult to find significant conductors related with geothermal fluids. Nevertheless the audio-magnetotelluric survey proved to be helpful for the regional mapping and, by detecting relatively conductive anomalies, for the understanding of the hydrothermal circulation in an environment of fractured basement.

All over the area, the survey has confirmed the geological limits of autochthonous and allochthonous formations and recognized the more important N-S and E-W tectonic limits of the units characterized by geochemical specificities, related with the different groups of mineral springs.

The NE part of the prospected area covers the sedimentary graben of the Limagne, with low resistivities and horizontal layers. The only conductors detected are linked to the Saint-Hérent group of thermal springs and located close to the contact between the basement and the sedimentary rocks. The SW part of the Cézallier is globally resistive and intersected either by more conductive N-S and NW-SE axes, or more resistive ones mainly in the EW direction.

In the Zagat-Chassolle area, where the boreholes of the GPF program are located, a more detailed survey was performed, with a high density array of AMT-soundings. A two-dimensional modelling has shown the existence of a NNE-SW conductive axis, associated to a direction of regional fracturation, detected by geology. The extension of this structure at depth is not known beyond approximately 2 km because the penetration depth of the method is less than 4 km for the lowest frequency. Those low resistivities (< 200 Ω m) may be related with the important circulations of mineralized fluids encountered in the drillholes.

A three-dimensional modelling performed over the SW part of the studied area, using the contrast between the high resistivities of the larger volcanic axes and the more conductive metamorphic basement, has demonstrated that bodies of relatively complex shape can be delineated qualitatively by audio-magnetotellurics. The conductive structure elongated along the E-W direction and located SW of Chassolle can stand for a drain for the fluids which supply the spring and the drillholes, according to a circulation scheme supported by hydrogeological and geochemical data.

* 2 av. Estienne-d'Orves, 06000 Nice

** Institut Mixte de Recherches Géothermiques AFME-BRGM
Av. de Concyr, BP 6009, 45060 Orléans Cedex

1. — Introduction

La prospection audio-magnétotellurique du socle du Cézallier (Aucel, 1987) a compris deux parties distinctes réparties sur trois ans de 1983 à 1985. La première a consisté en une série de 160 sondages effectués selon une couverture à maille large sur une zone s'étendant de Massiac au Sud jusqu'à la bordure méridionale de la Limagne au nord. La seconde (39 sondages) s'est concentrée sur un rectangle de 3 km² autour des villages de Zagat et Chassolle, en vue d'apporter des compléments d'informations pour l'implantation des forages S1 et S2 du programme GPF.

L'utilisation de cette méthode dans le cadre d'une recherche de réservoir géothermique s'est inspirée initialement des scénarios classiques d'exploration géothermique en terrain volcanique. Cela s'est rapidement avéré difficile, du fait de la présence quasi-générale de terrains très résistants disposés selon des structures complexes et de l'absence de couches conductrices bien individualisées pouvant être assimilées à des réservoirs géothermiques. De fait, l'idée de la présence de ceux-ci dans le sous-sol du Cézallier demandait à être approfondie et l'objectif des programmes de forage s'est orienté vers la connaissance au sens large des circulations hydrothermales en milieu de socle fissuré, plutôt que vers la recherche d'un hypothétique réservoir géothermique. L'interprétation des données audio-magnétotelluriques apparaît donc dans ce cas précis comme une aide à la cartographie géologique régionale, en délimitant les unités tectoniques et lithologiques les plus importantes par des différences de résistivité électrique. Pour ce qui est de l'étude plus fine de la zone Zagat-Chassolle, une modélisation bidimensionnelle a montré le prolongement d'un couloir de fracturation NNE-SSW déjà reconnu par la géologie, jusqu'à deux km de profondeur, voire au-delà.

2. — Interprétation qualitative des sondages audio-magnétotelluriques sur l'ensemble du Cézallier

Sur l'ensemble de la zone étudiée l'audio-magnétotellurique a mis en évidence l'existence de deux zones géophysiquement dissemblables : une zone nord-est tabulaire et de faible résistivité et une grande zone sud-ouest non tabulaire, globalement résistante et recoupée par des axes plus conducteurs N-S et NW-SE ou plus résistants, principalement E-W.

La partie nord-est correspond au fossé sédimentaire de Limagne et la partie sud-ouest au socle métamorphique du Cézallier. A l'intérieur de cet ensemble, on distingue des unités à conductivité différente correspondant aux terrains autochtones et allochtones ainsi qu'à un certain nombre d'appareils volcaniques.

Cette prospection a également permis de retrouver des limites tectoniques importantes telles que les failles N-S bordant les blocs de Rentières, d'Achat et d'Autrac et les failles E-W de Lussaud et de la Bave ou tel que le prongement vers le nord-ouest du groupe leptyno-amphibolique à hauteur de Rentières.

Les seuls conducteurs mis en évidence dans la zone nord-est, en relation avec les émergences thermales du groupe de Saint-Hérent, sont localisés au niveau du contact

socle-sédimentaire. Il est vrai que la connection entre anomalies géophysiques et hydrominérales est difficile à réaliser dans ce secteur où les déformations structurales et leur cortège d'altérations tendent à diminuer les résistivités de manière importante. Au sud de Rentières, on relève dans le socle des conducteurs ponctuels ne présentant jamais de conductances très élevées. Ils sont peu étendus, peu épais et certainement associés à des failles dans le cas du groupe des sources de Chantejail.

Il apparaît donc que l'audio-magnétotellurique a mis en évidence plusieurs « conducteurs » dans le socle du Cézallier mais leurs interconnexions et leurs relations avec les émergences sont difficiles à préciser. Aucune anomalie susceptible d'être assimilée à un réservoir hydrothermal n'a été détectée. Par contre, il existe des zones à conductivité relativement élevée que la conductivité intrinsèque des gneiss ou des leptynites ne suffit pas à expliquer. Elle nécessite la présence de fluides minéralisés au sein du socle fracturé. Ces fluides empruntent comme couloirs de circulation des plans de failles préférentiels, très redressés, et les zones de diaclases qui leur sont associées.

3. — Modélisation en deux dimensions (2 D) de deux profils E-W au nord de Chassolle

La densité des sondages au nord de la zone d'implantation des forages S1 et S2 (fig. 1) a permis l'interprétation plus

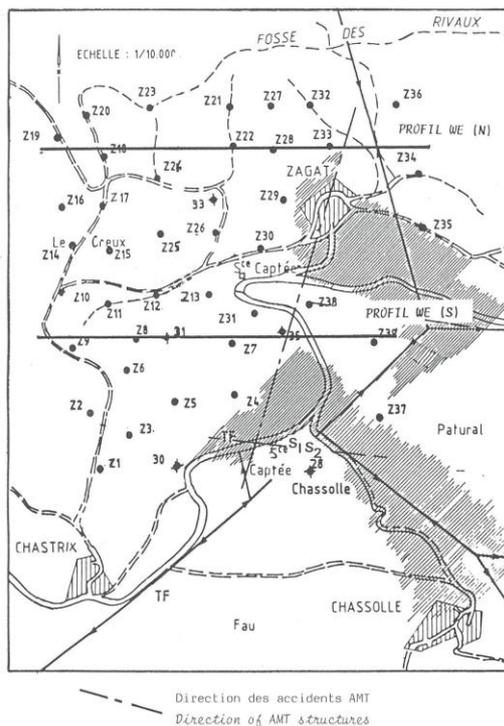


Fig. 1. — Position des deux profils modélisés en 2D
Location of the 2 profiles modelled with 2D program

précise des données audio-magnétotelluriques, à l'aide d'un programme d'inversion en deux dimensions. Celui-ci est inspiré de l'algorithme de Jupp et Vozoff (1975) et permet d'obtenir une distribution de résistivités réparties suivant des limites géométriques fixées a priori, approchant au mieux les données expérimentales. Afin de ne pas préjuger de la répartition spatiale des résistivités en profondeur, nous sommes partis d'une distribution en blocs (fig. 3), les limites horizontales étant définies par la position des stations des mesures, les limites verticales étant réparties logarithmiquement. Le nombre de résistivités que le programme peut faire varier correspond donc au nombre de blocs. Les différentes unités structurales ou lithologiques pourront être délimitées en associant plusieurs blocs contigus de résistivités voisines.

Sur la figure 2, la similitude entre résultats expérimentaux (en haut) et issus de la modélisation (en bas) peut être appréciée dans le cas du profil W-E(N) correspondant au modèle de la figure 3. Les pseudo-sections sont des coupes distance-fréquence d'isovaleurs de la résistivité apparente pour les deux modes, parallèle et perpendiculaire à l'axe de la structure 2D supposée. Sur la figure 3, le modèle de résistivité montre l'existence d'une zone de résistivité inférieure à 200 Ωm entre les stations Z 28 et Z 33 et s'étendant jusqu'à 2000 m de profondeur. Les coefficients de résolution correspondant à chaque résistivité (fig. 3 en bas) indiquent leur degré de résolution par ce modèle. Pour des valeurs proches de 1, la résistivité est considérée comme bien résolue ; pour des valeurs proches de 0, la résistivité n'a pas d'influence sur le comportement du modèle et sa fourchette de variation peut être très grande. La figure 4 correspond au profil W-E(S) pour lequel l'erreur RMS sur l'ensemble des sondages est meilleure que celle du profil W-E(N) : 0.14 pour le mode

perpendiculaire et 0.292 pour le mode parallèle. Nous observons à nouveau une zone conductrice dans la partie E du profil, entre les stations Z 35 et Z 38 (fig. 5). Cette zone semble s'étendre au-delà de 2000 m de profondeur, mais avec des facteurs d'atténuation compris entre 0.3 et 0.6, ce qui doit limiter la valeur de ce résultat.

La similitude entre les pseudo-sections de résistivité apparente des deux modes montre que, dans l'ensemble, cette interprétation peut être considérée comme valable. L'axe relativement conducteur (< 200 Ωm), décelé sur les deux profils, se superpose bien avec le couloir de fracturation de Zagat déjà reconnu par la géologie structurale et la télédétection (Feybesse, 1985). Ce même auteur mentionne la possibilité pour ce type de couloir de constituer un drain pour les eaux thermales, ce qui expliquerait la baisse de résistivité. L'aspect nouveau apporté par l'audio-magnétotellurique est leur prolongement jusqu'à plus de 2000 m en profondeur.

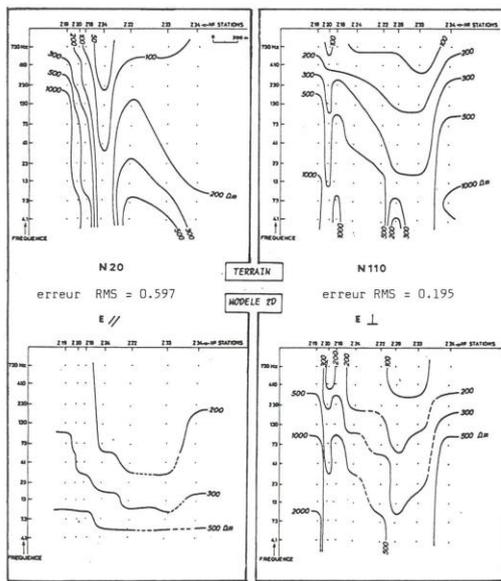


Fig. 2. — Comparaison entre pseudo-sections expérimentales et issues du modèle (profil EW [N])
Comparison between experimental pseudo-sections and results of 2D modelling (profile WE [N])

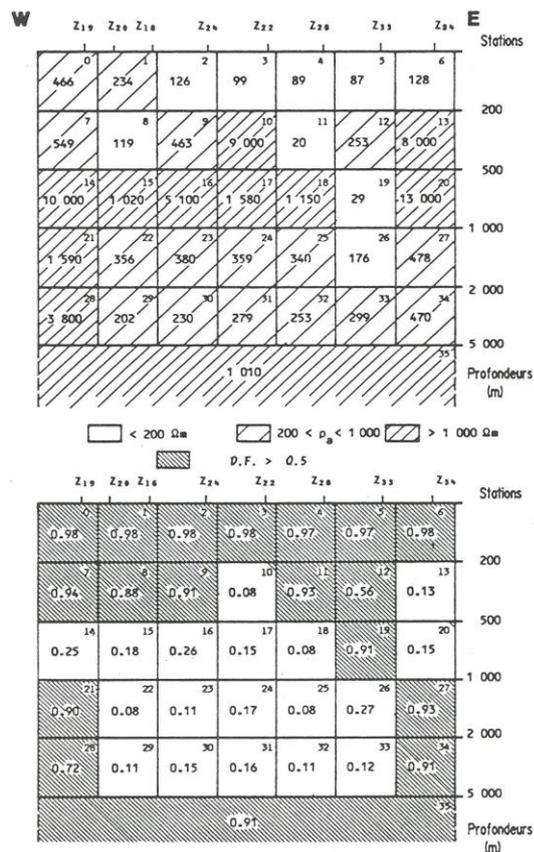


Fig. 3. — Modèle final de résistivités et coefficients d'atténuation (profil WE [N])
Final model of resistivities and corresponding damping factors

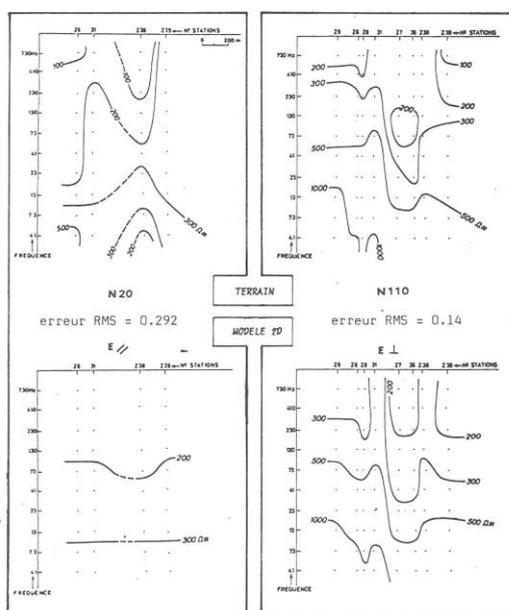


Fig. 4. — Comparaison entre pseudo-sections expérimentales et issues du modèle (profil WE [S])
Comparison between experimental pseudo-sections and results of 2D modelling (profil WE [S])

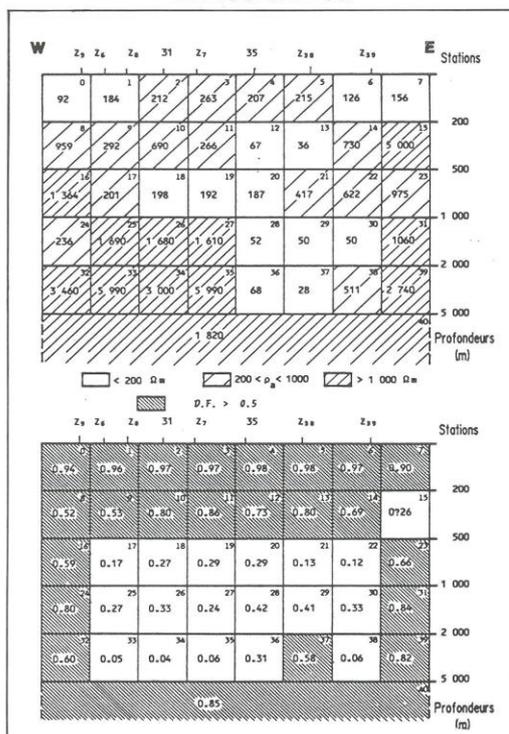


Fig. 5. — Modèle final de résistivités et coefficients d'atténuation associés (profil WE [S])
Final model of resistivities and corresponding damping factors.

4. — Modélisation en trois dimensions (3D) de l'ensemble du Cézallier

Afin de vérifier la validité de l'utilisation de la méthode pour délimiter de grandes unités structurales nous avons effectué une modélisation 3D d'une représentation schématique de la distribution supposée des résistivités dans le Cézallier. L'idée était de vérifier que pour les fréquences les plus basses utilisées (4.1, 7.3 et 13 Hz) les effets latéraux dus à des structures 3D (croisement de fractures, couloirs de fracturation non infiniment long, etc.) étaient peu significatifs, malgré des résistivités élevées impliquant des profondeurs de pénétration supérieures au kilomètre.

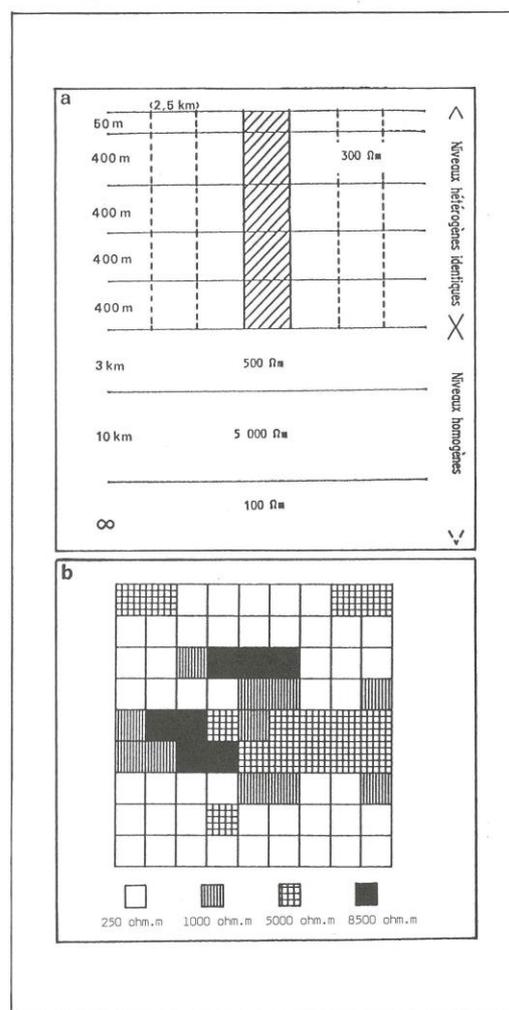
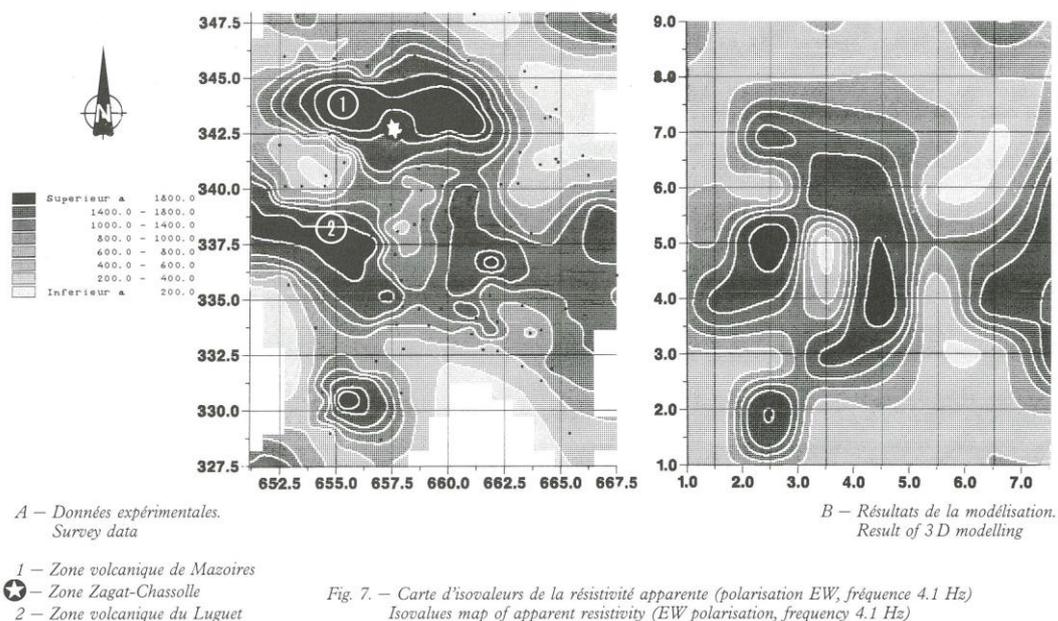


Fig. 6. — Description du modèle 3D — a) Coupe verticale — b) Disposition horizontale des différents blocs (la résistivité est homogène pour chaque bloc suivant la verticale)
Description of the 3D model — a) Vertical section — b) Layout of the different blocks (the resistivity is homogeneous for each block along the vertical)



Nous avons donc comparé les résultats de la modélisation 3D (algorithme de plaque mince de S. Park, 1985) représentés sous forme de cartes d'isovaleurs de la résistivité apparente pour les deux polarisations, aux cartes d'isovaleurs tracées d'après les données de terrain. Le modèle utilisé (fig. 6), très simplifié, consiste seulement en blocs résistants (3 résistivités différentes), noyés dans un encaissant de 250 Ω m, ceci afin de reproduire les contrastes entre zones très résistantes et zones plus conductrices relevés sur les cartes d'isovaleurs expérimentales. La ressemblance entre données de terrain et résultats du modèle peut s'observer sur la figure 7 (polarisation E-W — fréquence 4.1 Hz), ce qui permet de justifier en première approche l'utilisation des cartes d'isovaleurs pour délimiter des zones conductrices et résistantes.

En effet, la modélisation 3D ne permet pas actuellement de traiter avec précision des structures complexes, tant en extension horizontale qu'en profondeur. De plus, établir une image du Cézallier en termes de résistivités électriques paraît très difficile vu sa complexité, ainsi qu'il a été dit plus haut. Nous nous limitons donc à utiliser les cartes d'isovaleurs expérimentales d'un point de vue qualitatif, confirmant ainsi les résultats décrits dans le paragraphe 2.

Ce genre d'approche peut être utilisé pour restituer la zone Zagat-Chassolle dans un contexte plus large afin de délimiter des zones pouvant constituer soit des bassins d'alimentation hydrologique, soit des drains préférentiels pour les fluides rencontrés dans les forages. Nous reprenons le modèle proposé par Feuga *et al.* (1986) qui situe l'origine de ces eaux sur les sommets du Cézallier, 5 à 10 km au W.SW des forages. Là ces eaux s'écoulent en profondeur, du fait de la grande fracturation du socle sous-jacent et circulent par gravité vers l'Est-Nord-Est, c'est-à-dire vers la Limagne, en se réchauffant et s'enrichissant en composants minéraux d'origine mantellique. D'après les mesures audio-magnétotelluriques ce drain préférentiel de circulation pourrait être

l'axe conducteur E-W repéré entre l'anomalie résistante ($> 2000 \Omega$ m) du Luguet au sud et celle de Mazoires au nord, toutes deux attribuées à des appareils volcaniques. Le fait que les résultats de terrain pour la fréquence 4.1 Hz, qui est celle de plus grande profondeur de pénétration dans la gamme audio-magnétotellurique, indiquent des résistivités inférieures à 100 Ω m, en accord avec la modélisation 3D, montre la possibilité de l'existence d'un couloir E-W, de plus de 1500 m d'épaisseur et d'un à deux kilomètres de large. Sa résistivité choisie égale à 250 Ω m dans la modélisation, est de l'ordre de grandeur de celle d'un socle résistant très fissuré et siège de circulations hydrothermales. Au niveau de Zagat-Chassolle, zone décalée vers le nord par rapport au drain décrit précédemment, l'existence d'importants couloirs de fracturation d'orientation méridienne peut expliquer la déviation de cette circulation vers le nord jusqu'à l'aplomb de la source et des forages de Chassolle.

Ces hypothèses, bien que schématiques et établies à partir d'un modèle assez éloigné de la réalité, peuvent constituer un élément pour la compréhension de la circulation hydrologique dans cette zone, en attribuant l'abaissement de la résistivité du socle, normalement très résistant, à une circulation de fluides minéralisés.

Par contre, la profondeur d'exploration de la méthode ne dépasse pas 1,5 km de profondeur, au-delà de laquelle les fluides doivent nécessairement descendre, comme l'indiquent les géothermomètres. La validité du modèle de la figure 6 est donc limitée aux cinq premières couches, les couches sous-jacentes étant considérées comme homogènes et sans grande influence sur les résultats. D'autre part, le fait que la résistivité de l'encaissant soit égale partout à 250 Ω m autour des blocs résistants, ne signifie pas pour autant qu'il existe des circulations de fluides en tous lieux dans le Cézallier, ainsi qu'il a été proposé pour l'anomalie conductrice située au sud-ouest de Zagat.

5. — Conclusion

En principe les méthodes électromagnétiques sont spécialement adaptées à la recherche de zones à faible résistivité. Mais dans un milieu à fracturation aussi dense que le socle du Cézallier, où, de plus, les émergences sont très nombreuses et diffuses, la prospection par méthodes électriques ou électromagnétiques ne peut aboutir à des résultats très précis.

Avant la campagne d'acquisition des données audio-magnétotelluriques, il ne nous était pas possible de dire si cette méthode serait efficace pour ce type de recherches. En effet, l'audio-magnétotellurique avait déjà été utilisée pour des prospections de type géothermal mais en milieu sédimentaire et volcanique. L'idée première de ce travail était d'essayer de suivre en profondeur les réseaux d'alimentation des émergences. Cela n'a pas été possible à cause de l'absence de marqueur réellement conducteur pouvant leur être associé.

On a donc tenté une interprétation qualitative pour des sites audio-magnétotelluriques très espacés, ce qui est toujours possible même en milieu anisotrope et qui a apporté des informations intéressantes quant à la connaissance globale de la géologie régionale. Il apparaît de bonnes corrélations avec les autres méthodes, tant géologiques que géophysiques, en particulier la gravimétrie (Debeglia *et al.*, 1985), utilisées dans le Cézallier. En effet, les structures observées sur le terrain en géologie et celles déduites de la gravimétrie coïncident bien avec les résultats de l'audio-magnétotellurique.

La modélisation 2 D sur la zone de Zagat-Chassolle, a été plus délicate puisqu'on y rencontre plusieurs directions de fracturation. La structure de type faille verticale conductrice N-S a été reconnue comme étant dominante sur les profils E-W et son extension en profondeur jusqu'à plus de 2000 mètres confirment l'ouverture actuelle de cette ancienne direction de fracture hercynienne ayant rejoué à l'Oligocène.

Sa faible résistivité indique des circulations de fluides minéralisés importantes qui sont à mettre en relation avec les niveaux aquifères et les filons de nature diverse traversés par les forages de Chassolle.

La modélisation 3 D effectuée sur une partie du périmètre étudié à partir des grands axes volcaniques résistants dans le socle métamorphique plus conducteur, a démontré qu'on peut délimiter en audio-magnétotellurique des corps simples modélisables en 3D. Ceci justifie l'utilisation de l'audio-magnétotellurique comme aide qualitative à la cartographie régionale, le contour des anomalies ayant été défini à partir des données expérimentales. Par ailleurs, l'axe conducteur E-W situé au sud-ouest de Chassolle est proposé comme drain des fluides alimentant la source et les forages, en accord avec un schéma de circulation s'appuyant sur des données hydrogéologiques et géochimiques.

Bibliographie

- AUCEL M. (1987). — Étude du socle fissuré du Cézallier par la méthode audio-magnétotellurique. Thèse de Doctorat, Univ. Paris 6, 132 p.
- DEBEGLIA N., VIDAL O. (1985). — Synthèse des travaux gravimétriques réalisés sur le site du Cézallier dans le cadre de GPF2. Rapport BRGM n° 85 DT 003 GPH.
- FEUGA B. *et al.*, (1986). — Le système hydrominéral du Cézallier (Massif Central Français). Reconnaissance par sondage de moyenne profondeur (programme Géologie Profonde de la France, sondages S1 et S2 de Chassolle, juillet-décembre 1985). *C.R. Acad. Sci. Fr.*, série II, n° 16, pp. 1497-1502.
- FEYBESSE J.-L. (1985). — Synthèse géologique du Cézallier. GPF 2, thème 10. Document BRGM n° 95-10, pp. 45-92.
- JUPP D.L.B., VOZOFF K. (1975). — Stable iterative methods for the inversion of geophysical data, *Géophys. J.R. Astr. Soc.* **42**, pp. 957-976.
- PARK S. (1985). — Distortion of magnetotelluric sounding curves by the three-dimensional structures, *Geophysics*, **50**, n° 5, pp. 785-797.