

## Le système géothermal du Cézallier : cadre géologique général et reconnaissance par sondages

B. Feuga \*

Mots-clés : Système géothermique, Tectonique cassante, Tectonique tangentielle, Sondage, Géophysique, Source, Géothermométrie, Gradient géothermique, Sondage Puy-de-Dôme, Cantal, Haute-Loire (Cézallier).

### Résumé

Le socle métamorphique hercynien du Cézallier (Massif central français) est caractérisé par la présence d'un grand nombre de sources minérales froides et carbogazeuses, produisant des eaux de type bicarbonaté-sodique. Les géothermomètres à cations indiquent que ces eaux ont connu des températures de l'ordre de 200 °C lors de leur parcours souterrain, cependant que la valeur très élevée de leur ratio  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  témoigne d'un apport important d'éléments d'origine mantellique au système. La région a été le siège de manifestations volcaniques culminant au Pliocène, avec une réactivation, responsable de plusieurs petits cônes stromboliens, au Quaternaire récent.

Le gradient géothermique régional, mesuré dans des sondages de faible profondeur, ne présente pas d'anomalie marquée.

Deux sondages, de 500 et 1 400 m de profondeur, ont été réalisés sur le site de Chassole, à proximité immédiate d'une source minérale, en vue de prélever des fluides profonds, mesurer le gradient géothermique en profondeur, réaliser une caractérisation hydrodynamique et diagraphique des terrains et obtenir des carottes pour les études pétrographique et structurale ainsi que celle des phases néo-formées.

Les sondages, qui sont restés intégralement dans la même formation d'orthogneiss, ont recoupé quatre zones fracturées aquifères imprégnées d'eau de même type que celle de la source voisine. La température mesurée à 1 400 m est de 58 °C, mais le gradient semble perturbé par des circulations d'eau.

### Abstract

*The Cézallier geothermal system : geological framework and borehole investigation.*

A number of cold CO<sub>2</sub>-rich mineral springs flow out of the metamorphic Variscan basement of Cézallier (French Massif central). Their water is of the sodium-bicarbonate type. Cations geothermometers show that it experienced temperatures as high as 200 °C during its underground cycle, whereas its very high  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  ratio denotes an important mantellic component in the system.

Volcanic phenomena have occurred in the area, culminating during the Pliocene, with a reactivation responsible for several Strombolian cones in the recent Quaternary.

The regional geothermal gradient, as measured in shallow boreholes, exhibits no particular anomaly.

Two boreholes, 500 m and 1 400 m deep, were drilled at Chassole, just next to a mineral spring, in order to sample deep fluids, measure the geothermal gradient at depth, characterise the rock from hydraulic and physical points of view, and get cores for carrying out petrographic and structural studies, as well as that of the hydrothermal products.

The boreholes, which remained entirely in the same orthogneissic formation, intersected four fractured water-bearing zones with water of the same type as that of the neighbouring spring. The temperature at 1 400 m measured 58 °C, but it seems that the gradient is disturbed by water flows.

\* SGN/GEG, BRGM, Orléans

## Introduction

La région du Cézallier, située aux confins des départements du Puy-de-Dôme, du Cantal et de la Haute-Loire, à environ 60 km au sud de Clermont-Ferrand (Massif central français), est caractérisée par la présence d'un grand nombre de sources hydrominérales émergeant du socle hercynien. Cette région a été considérée par les responsables du programme « Géologie Profonde de la France » (GPF), comme particulièrement favorable à la réalisation de sondages destinés à étudier le fonctionnement d'un système géothermal actif dans un socle. Précédés de plusieurs phases d'études de terrain destinées dans un premier temps à préciser le contexte géologique, et plus particulièrement structural, du système hydrominéral et les caractéristiques hydrogéochimiques de celui-ci, puis à sélectionner un site de sondage, les travaux de forage ont été effectués de juillet à novembre 1985.

Après une présentation rapide des principaux types de systèmes géothermaux existant dans le monde, destinée à y situer celui du Cézallier, cette note expose succinctement l'état des connaissances sur ce système avant la réalisation des forages et rappelle les objectifs de ceux-ci. Elle décrit les travaux réalisés sur le chantier et présente les principaux résultats scientifiques obtenus au cours de celui-ci. Elle se veut essentiellement une introduction aux autres articles rassemblés dans cet ouvrage, destinée à éviter que la présentation du cadre général des études ne soit répétée dans chacun d'eux.

Pour plus de détails, on se réfèrera aux rapports d'étude et comptes-rendus du thème 10, « Géothermalisme actuel » du programme GPF, édités dans la série « Documents du BRGM » (voir bibliographie, in fine). Les résultats mentionnés dans cette note par le seul nom de leur auteur, sans autre référence, sont tirés de ces documents.

## Généralités sur les systèmes géothermaux

Les indications qui suivent s'appuient essentiellement sur les travaux sur le géothermalisme des scientifiques néo-zélandais et américains, parmi lesquels en particulier Ellis et Mahon (1977), Henley et Ellis (1983), Mahon et al (1980), Fournier (1983), Mariner et al (1983).

Dans un sens très général, relève du géothermalisme tout phénomène caractérisé par une augmentation de température due à un séjour en profondeur. Dans la mesure où la substance qui s'échauffe est l'eau souterraine, il peut être préférable de parler d'hydrothermalisme, à condition de ne pas limiter ce terme aux phénomènes thermiques liés aux manifestations volcaniques ou à la cristallisation d'un magma.

Les systèmes géothermaux — ou hydrothermaux — sont en effet très divers, et certains sont sans rapport avec ces phénomènes.

Une classification des systèmes géothermaux fondée sur la nature de la source de chaleur qui les alimente amène ainsi à distinguer :

- les systèmes associés au magmatisme actuel ou récent (volcanisme, activité intrusive en cours ou refroidissement de gros plutons dans les dix premiers kilomètres de la croûte) ; ces systèmes englobent de nombreux champs géothermiques de haute énergie, où l'on peut rencontrer des températures de 350 °C à des profondeurs parfois inférieures à 2 500 m (exemples : Japon, Italie, Islande, Mexique, États-Unis) ;
- les systèmes sous-marins liés aux zones d'expansion des fonds océaniques, marqués par d'importantes anomalies thermiques positives (exemple : ride médo-atlantique) ;
- les systèmes reliés aux zones de collision de la tectonique des plaques, où l'érosion, très rapide, rapproche de la surface des roches profondes plus vite qu'elles ne perdent leur chaleur par conduction (exemples : Alpes, Montagnes Rocheuses, Alpes néo-zélandaises) ;
- les systèmes de bassins sédimentaires où les eaux s'échauffent par circulation à grande profondeur dans des zones de gradient géothermique normal (exemples : Bassin parisien, Hongrie).

Il est également possible de classer les différents types d'eau des systèmes géothermaux, sachant que les études isotopiques ont montré que dans tous les cas ces eaux étaient des eaux d'origine météorique qui ont acquis leur minéralisation au cours de leur parcours souterrain, à des profondeurs pouvant dépasser 5 km. Les composants d'origine profonde dans les eaux géothermales n'y sont en général présents qu'en très faible proportion. La composition géochimique des eaux géothermales résulte des équilibres entre le fluide et les minéraux des roches traversées, qui dépendent de la température. Seuls échappent à cette règle  $\text{Cl}^-$ , du fait de sa très grande solubilité, et les gaz rares.

Les principaux types d'eau rencontrés sont les suivants :

- eaux chlorurées sodiques ; ces eaux peuvent résulter d'une percolation dans des roches sédimentaires déposées en milieu marin. Une concentration élevée en  $\text{Cl}^-$  peut aussi provenir de la circulation dans certains granites. Enfin, il arrive qu'une partie du chlore soit d'origine magmatique.

De fortes concentrations en  $\text{Cl}^-$  impliquent une longue durée de réaction, donc une circulation profonde et des températures élevées. Les eaux de type NaCl sont caractéristiques des parties profondes des systèmes de haute énergie ;

- eaux sulfatées sodiques plus ou moins chlorurées, traduisant soit une dissolution du gypse ou de l'anhydrite de roches sédimentaires, soit une oxydation de sulfures dans des zones minéralisées ;

— eaux bicarbonatées, sodiques et/ou calciques, dont la concentration est d'autant plus élevée que l'origine du  $\text{CO}_2$  dissous est plus profonde. Le cation dominant est  $\text{Ca}^{++}$  si les eaux circulent dans des terrains calcaires,  $\text{Na}^+$  si elles circulent dans des terrains contenant des silicates ou alumino-silicates de sodium ;

— eaux « mixtes », résultant de changements dans la nature des terrains traversés ou dans les profondeurs de circulation. A cette catégorie, on peut rattacher un type particulier, les eaux bicarbonatées-sulfatées-sodiques à pH neutre ou acide dont il a été montré qu'elles étaient liées à des systèmes à NaCl plus profonds et plus chauds dont s'échappent  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  et vapeur d'eau qui percolent à travers une zone de colmatage à silice les surmontant.

Ceci montre que peuvent coexister au sein d'un même système géothermal plusieurs types d'eau différents. La présence de gaz, libres ou dissous, en quantité parfois très importante, constitue une caractéristique des systèmes géothermaux. Parmi les gaz les plus fréquemment rencontrés dans ces systèmes on trouve en premier lieu CO<sub>2</sub>, qui représente en général plus de 85 % de leur volume total, puis N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> et des gaz rares (He, Ar). Les origines de ces gaz sont diverses : atmosphère (N<sub>2</sub> et Ar), processus métamorphiques ou magmatiques (CO<sub>2</sub>) et, bien entendu, réactions chimiques entre minéraux des roches et fluides géothermaux (CO<sub>2</sub>, provenant des carbonates et du carbone organique).

On peut enfin classer les systèmes géothermaux en fonction du moteur des écoulements qui s'y produisent – dans les systèmes de haute énergie, marqués par des anomalies positives importantes du flux géothermique, l'influence de la convection thermique est prédominante (remontée des fluides chauds, moins denses).

Il est classique de distinguer deux grands types de systèmes de ce genre : les systèmes à eau chaude dominante, où les fluides sont essentiellement sous forme liquide avant la mise en exploitation du gisement et les systèmes à vapeur dominante, où la vapeur (vapeur d'eau et gaz) constitue la phase principale du système.

Il est à noter que le gaz carbonique joue un rôle déterminant et complexe dans le fonctionnement de ces systèmes ;

– dans de nombreux systèmes, le rôle de la convection thermique est soit très faible, soit nul, et les écoulements sont dus à la différence de charge hydraulique entre les zones de recharge (points hauts) et les zones d'émergence (points bas).

Pour compléter cette présentation des systèmes géothermaux, on peut mentionner un certain nombre d'indications complémentaires. C'est ainsi que ces systèmes se développent toujours dans des zones de perméabilité de fractures élevées.

Leurs manifestations en surface (émission de gaz, sources minérales) peuvent intervenir à de grandes distances (jusqu'à 20 km) du centre géothermal actif.

Enfin on a pu montrer que la durée de l'activité géothermale pouvait atteindre et dépasser le million d'années, cette activité ayant toutefois en général un caractère discontinu.

Quant à l'âge des eaux géothermales, traduisant leur temps de transit dans un système, il est difficile à déterminer. Notons toutefois que des âges de 10 000 ans ont été proposés pour les eaux de sources de la « Northern Basin and Range province » dans les Montagnes Rocheuses.

Si les premières recherches sur les sources thermales remontent à plus d'un siècle, ce n'est que récemment, à partir des années 1970, que les perspectives d'exploitation de l'énergie géothermique ont amené une multiplication de celles-ci.

Les aspects géochimiques du fonctionnement des systèmes géothermaux, en particulier, ont fait l'objet de nombreuses études, dans des contextes très variés.

Leur connaissance hydrogéologique semble à l'heure actuelle moins avancée, de même que les techniques adaptées à leur reconnaissance et à l'évaluation de leurs ressources énergétiques.

Les études entreprises sur le Cézallier dans le cadre du programme Géologie Profonde de la France revêtent un caractère très ambitieux, puisqu'elles visent à étudier à la fois tous les aspects (historiques, géochimiques, géothermiques, hydrogéologiques) du fonctionnement d'un système géothermal particulier à bien des égards puisque, comme on le verra, il emprunte ses caractères à des modèles assez différents les uns des autres. Une telle approche globale n'a été tentée jusqu'à présent que sur un très petit nombre de systèmes, qui tous appartiennent à des zones de haute énergie reconnues et dont les manifestations en surface sont bien visibles.

## Le cadre géologique régional

Le socle du Cézallier est constitué de terrains métamorphiques appartenant à la zone interne varisque (P. Tempier, J.-L. Feybesse).

Sa structuration, comme celle de l'ensemble du Massif central, résulte essentiellement de la succession :

- d'une phase de raccorçissement intracrustal intense responsable, au cours de l'orogenèse varisque, de nappes crustales symétaborphes ;
- du régime tectonique compressif tardif-hercynien caractérisé par une déformation cassante à l'origine du champ de fracturation affectant le Cézallier ;
- et enfin de la tectonique distensive oligocène.

Le Cézallier est également le siège, à partir de la fin du Miocène, de phénomènes volcaniques qui se poursuivent jusqu'au Quaternaire récent (Thonat, Jeambrun).

Le socle du Cézallier (fig. 1 et 2) comprend un soubassement de terrains considérés comme para-autochtones, recouvert par un ensemble chevauchant allochtone. Ces séries sont organisées en une vaste antiforme d'axe NW-SE au cœur de laquelle apparaissent, dégagés par l'érosion, les terrains para-autochtones, constituant la « fenêtre de Massiac ». Ces terrains comportent des paragneiss à biotite et sillimanite et deux massifs d'orthogneiss, dont le plus important, celui de Saint-Alyre-es-Montagne, à affinité calco-alcaline, couvre une vaste superficie dans la partie NW de la zone d'étude.

L'allochtone, quant à lui, comporte à sa base une formation très hétérogène, qualifiée de « groupe leptyno-amphibolique », qui constitue régionalement un repère lithologique et structural majeur (Forestier, 1961 ; Burg, 1977 ; Lasnier et al., 1982 ; Mathonnat, 1983).

Le groupe leptyno-amphibolique est surmonté par un ensemble important de formations anatectiques qui affleurent au NE et au SW de la fenêtre de Massiac.

Ce chevauchement du groupe leptyno-amphibolique et des migmatites (allochtone relatif) sur l'autochtone para- et orthogneissique est rattaché à la tectonique tangentielle synmétaborphique évoquée ci-dessus et datée probablement du Dévonien inférieur (Burg, 1977 ; Mathonnat, 1983).

Cette tectonique revêt une importance particulière dans la structuration du socle du Cézallier, puisqu'elle est à l'origine de la quasi-totalité des structures souples qui l'affectent, en particulier la foliation S1-2, des plis d'entraînement synfoliaux P1-2 et une linéation d'éirement L1-2. L'indice 1-2 regroupe les termes 1 et 2 de Burg (1977) qui s'inscrivent dans un continuum de déformation.

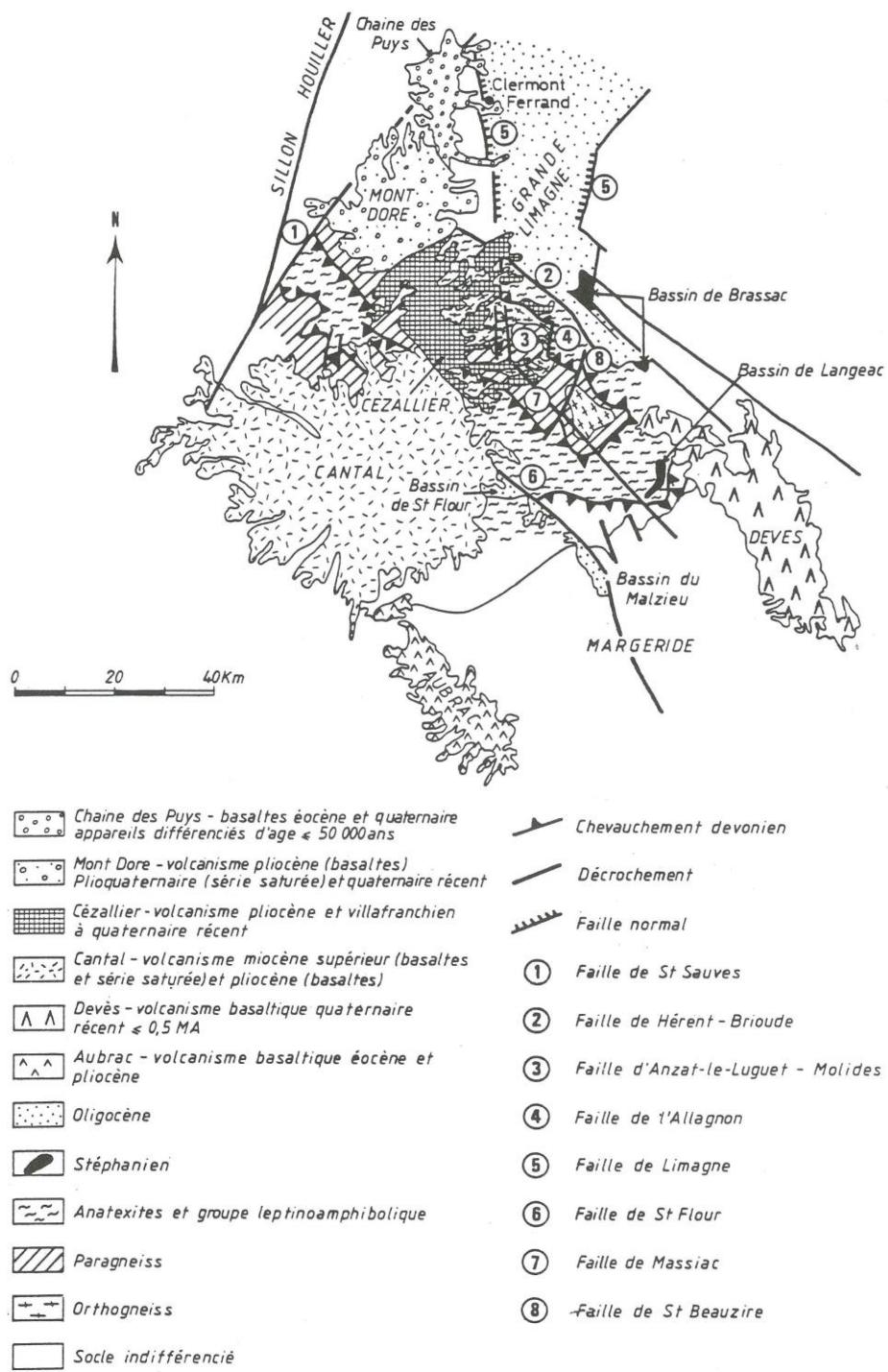
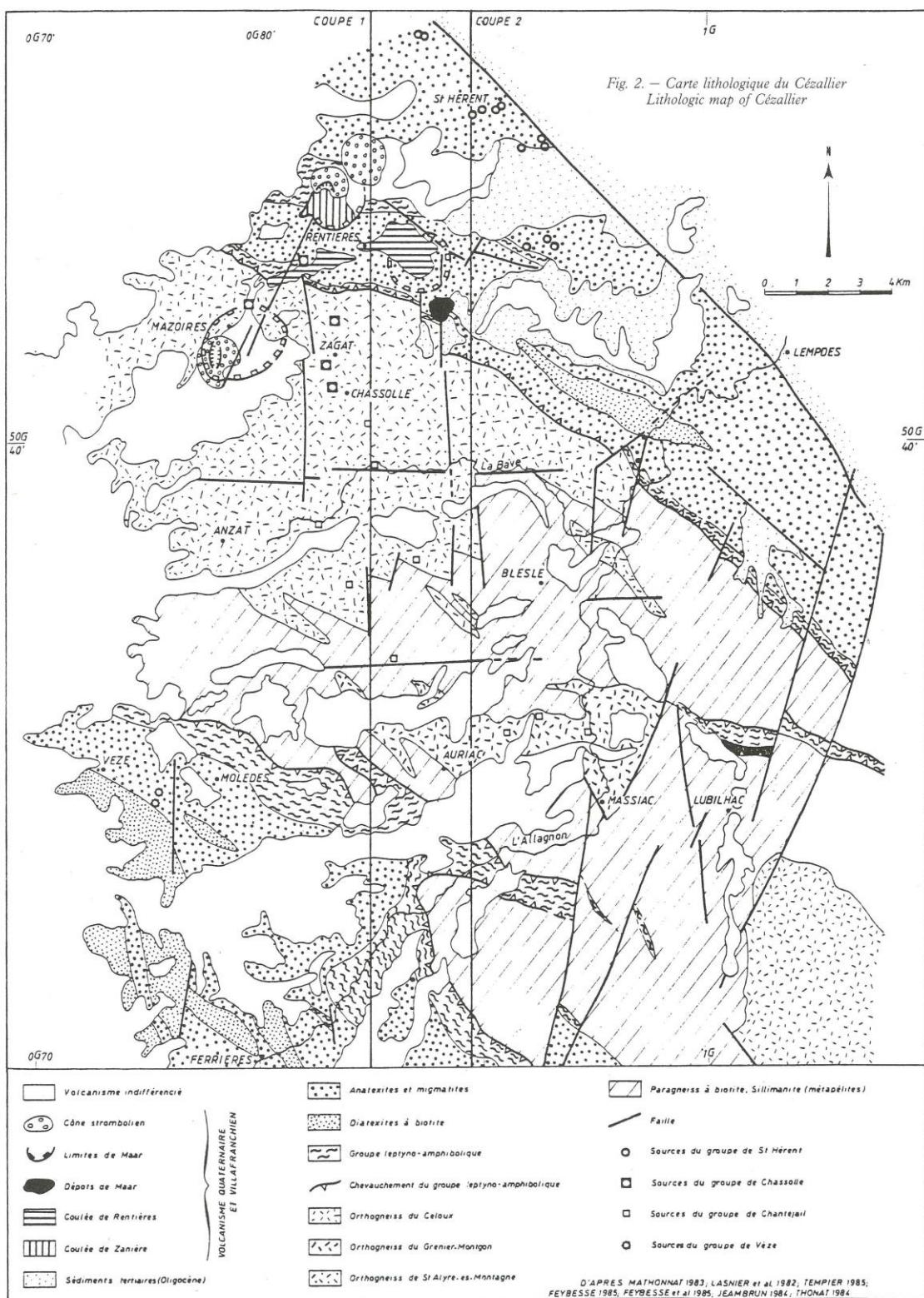


Fig. 1. — Cadre géologique régional (d'après Feybesse, 1985)  
Regional geological Framework



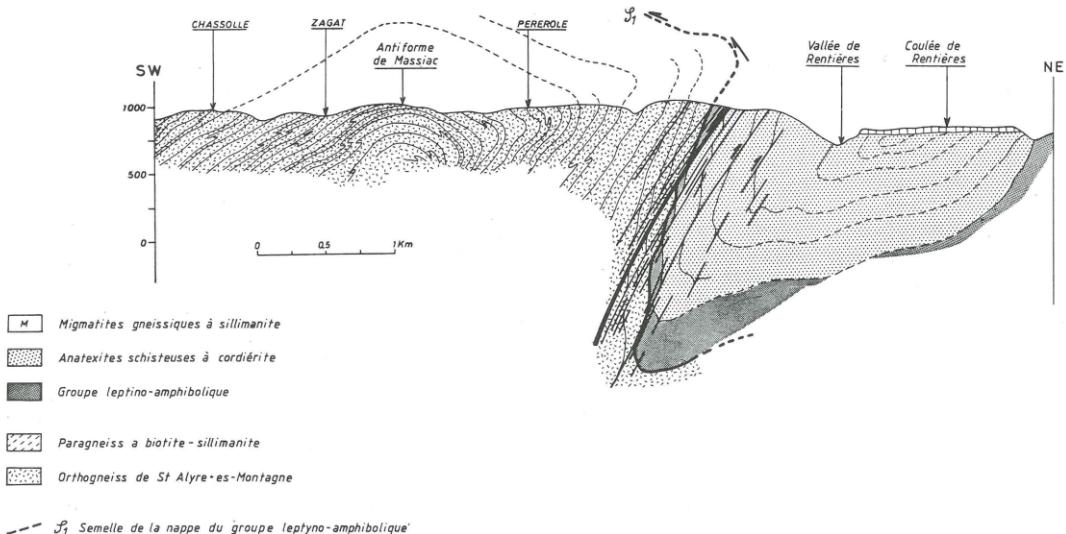


Fig. 3. - Coupe géologique du Cézallier  
Geological cross-section of Northern Cézallier  
d'après Mathonnat 1983, Lasnier et al 1982, Tempier 1985, Feybesse 1985, Feybesse et al 1985

Le chevauchement, globalement orienté vers le Sud, est responsable de plisements P3 parfois intenses, particulièrement bien marqués dans le groupe leptino-amphibolique dont ils provoquent des répétitions observables aussi bien au NE qu'au SW de la fenêtre de Massiac.

Dans la région d'Ardes sur Couze, à quelques km au N du site de forage de Chassole, ces plis sont responsables du pendage S du contact allochtone-autochtone (fig.3).

Au tardi-hercynien, une série d'épisodes cassants compressifs provoque l'apparition ou le rejet, dans le Cézallier et ses environs de grands décrochements fortement pentés, de directions essentiellement N-S et NW-SE (mais également EW et NE-SW), le long desquels peuvent apparaître des bassins stéphaniens. Ces décrochements découpent le socle en blocs à l'intérieur desquels les déplacements suivant les fractures sont restés limités (fig.4).

Quant à la distension oligocène, elle provoque essentiellement le rejet en failles normales de certains de ces accidents, entraînant des mouvements relatifs (abaissements et basculements) des différents blocs, dont l'arrangement constitue un des traits marquants de la structure actuelle du Cézallier.

La tectonique post-oligocène est évidemment de beaucoup moins grande ampleur, mais elle n'en joue pas moins très certainement un rôle dans le fonctionnement du système hydrominéral.

La tectonique, en effet, détermine la direction des contraintes, et donc celle des fractures ouvertes susceptibles de se prêter à la circulation des fluides.

Pour ce qui est de la période actuelle, l'étude des mécanismes au foyer des séismes encadrant le Cézallier montre que les contraintes sont favorables à une ouverture en tension des fractures sub-méridiennes (Godefroy et al.).

- Limite de groupe de sources  
Limit of group of springs
- ◊ Source du groupe de Conches-Pyronnée  
Conches-Pyronnée group spring
- Source du groupe de Chantejail  
Chantejail group spring
- △ Source du groupe de Chassole  
Chassole group spring
- Source du groupe de Saint-Hérent  
Saint-Hérent group spring
- 52 Rapport Cl/SO<sub>4</sub> dans l'eau de la source  
Cl/SO<sub>4</sub> ratio in spring water
- 8 Rapport Na/K dans l'eau de la source  
Na/K ratio in spring water
- ~~ Contour géologique (socle/terrains tertiaires et quaternaires ; autochtone/allochtone ; orthogneiss/paragneiss)  
Geological contour
- / Faille  
Fault
- ~~~~ Faille normale oligocène  
Oligocene normal fault
- ↖ Faille dextre  
Dextral fault

- 1 — Limagne — 2 — Bloc de Saint-Hérent — 3 — Bloc de Saint-Alyre — 4 — Bloc de Rentières — 5 — Bloc d'Apchat — 6 — Bloc d'Autrac — 7 — Bloc de Vèze — 8 — Bloc de Molèdes-Laurie — 9 — Faille de la Chappelle-Marcousse — 10 — Faille d'Ardes — 11 — Faille de la Bave — 12 — Faisceau de Mazoires.

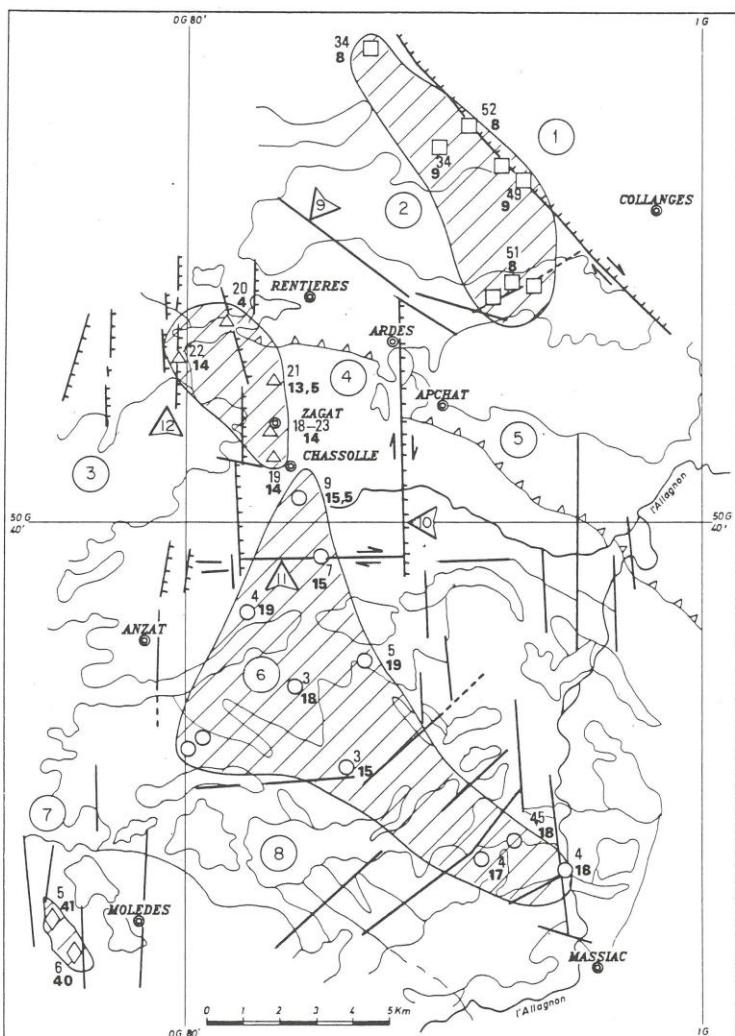


Fig. 4. - La structure en blocs du socle du Cézallier et la localisation des différents groupes de sources  
(d'après Feybesse, 1985, Fouillac, 1985, modifié)

Structure of the Cézallier basement showing the different blocks delimited by big faults. Location of the different groups of mineral springs

Les observations néotectoniques (Manigault) amènent à préciser ce résultat : elles mettent en effet en évidence un bombement localisé du socle, propre au seul Cézallier, qui tendrait à superposer à la compression NNW-SSE quaternaire, liée à la tectonique des plaques, une extension locale.

C'est ainsi que l'analyse structurale de la fracturation a montré qu'au Quaternaire récent, les fractures en extension susceptibles de se prêter à la circulation des eaux thermales seraient non seulement les fractures sub-méridiennes, mais également des fractures ENE-WSW à ESE-WNW, au moins dans la partie superficielle de la croûte du Cézallier.

La géologie de ce dernier est enfin marquée par le volcanisme, amorcé à la fin du Miocène, mais dont l'essentiel des manifestations est d'âge plio-quaternaire (Thonat).

Au Pliocène inférieur, ont lieu, au cœur du massif, des émissions de laves basaltiques.

Le paroxysme de l'activité volcanique donne lieu, au Pliocène moyen, à des épandements dits « périphériques » de laves basaltiques déficitaires en silice qui soulignent le réseau hydrographique de l'époque et à l'édition d'un strato-volcan constitué de produits assez variés (sous-saturés et saturés), le massif du Luguet.

A partir du Villafranchien, et tout particulièrement au Quaternaire récent, intervient une reprise de l'activité volcanique qui se traduit très souvent par des éruptions phréatomagmatiques, suivies d'une phase d'activité strombolienne avec émission de laves basaltiques. Les caractères de ce volcanisme jeune peuvent s'expliquer par une fracturation intense des terrains et semblent confirmer l'existence locale, dans un passé récent, d'un régime distensif tendant à l'ouverture des fractures et donnant au socle un caractère particulièrement aquifère. Le caractère fissural et non différencié de ce volcanisme très récent exclut l'existence de chambres magmatiques intracrustales superficielles encore chaudes.

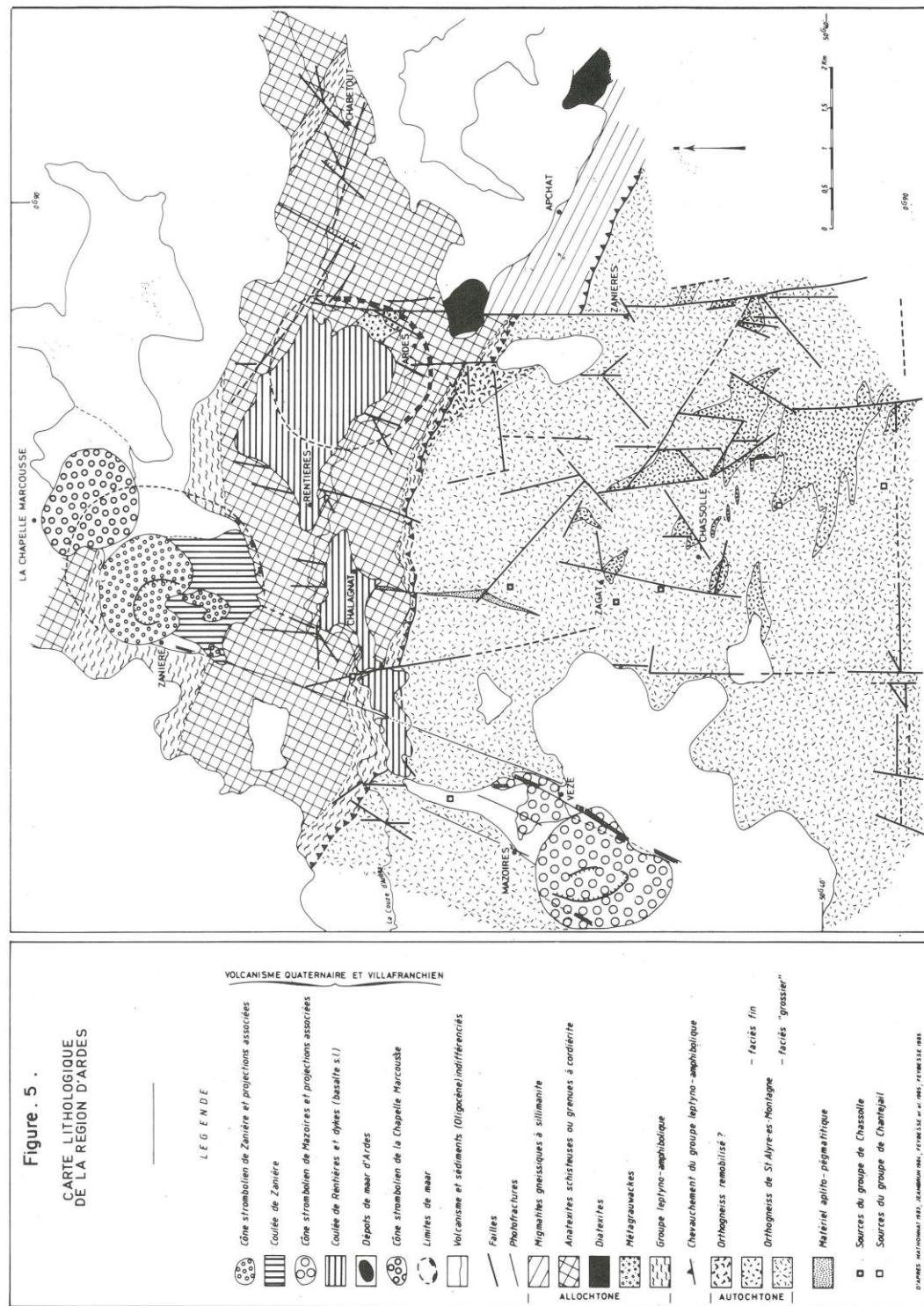


Fig. 5. - Carte lithologique de la région d'Ardes  
Lithologic map of the region of Ardes

## La géologie de la zone de Chassole

La zone de Chassole (fig. 5), retenue pour les sondages, se situe entièrement dans l'orthogneiss de Saint-Alyre, ce dernier présentant dans ce secteur, d'après les résultats gravimétriques, une épaisseur de plusieurs kilomètres. L'orthogneiss se présente, en général, sous un faciès grossier, mais il existe également un faciès fin, représenté en particulier à peu de distance des sources de Chassole et Zagat.

La zone étudiée se trouve, du point de vue structural, sur le flanc sud, faiblement penté ( $20$  à  $40^\circ$ ) vers le sud, de l'antiforme P3 post-schisteuse de Massiac. L'axe de cette antiforme, de direction WNW à ESE, passe à environ 1 km au nord des sources de Zagat. Au nord de cet axe, la foliation présente un pendage N de plus en plus fort, jusqu'à ce que, le flanc nord de l'antiforme se déversant, elle présente à nouveau un pendage sud, très accentué. La coupe SW-NE de la figure 3, passant par Chassole et Zagat, illustre cette structure.

La zone de Chassole se situe à l'intérieur du bloc de Rentières (fig. 4), délimité par les failles tardi-hercyniennes, ayant rejoué à l'Oligocène, de la Chapelle-Marcousse au nord, d'Ardes à l'est, de la Bave au sud, et du faisceau de Mazoires à l'Ouest.

La faille E-W de la Bave abaisse le bloc de Rentières par rapport à celui d'Autrac, situé au sud, lui-même abaissé par rapport à celui de Molèdes-Laurie. Le jeu de la faille N-S d'Ardes a entraîné un décalage dexter du groupe leptyno-amphibolique et abaissé le bloc de Rentières par rapport à celui d'Apchat à l'est. La bordure ouest du bloc de Rentières est marquée par une série de failles normales à regard est constituant autant de gradins qui l'abaissent progressivement par rapport au bloc de Saint-Alyre-ès-Montagne.

Si l'on observe enfin que la faille de la Chapelle-Marcousse semble avoir abaissé le bloc de Rentières par rapport à celui de Saint-Hérent, on constate que le bloc de Rentières se trouve abaissé par rapport à tous ceux qui l'entourent.

Comme l'ensemble du socle du Cézallier, le bloc de Rentières est marqué par une intense fracturation (failles et diaclases) pour l'essentiel subverticale. Les directions de la fracturation les mieux représentées à proximité des sources de Chassole et de Zagat sont N  $25^\circ$  E (NNE-SSW), N  $120^\circ$  E (WNW-ESE) et N  $135^\circ$  E (NW-SE), les directions ENE-WSW et N-S étant également présentes.

La zone d'émergence des sources de Chassole et Zagat est caractérisée enfin par la présence de nombreux filons aplito-pegmatito-leucogranitiques, se présentant soit isolés, subverticaux et de direction N-S à NNE-SSW, soit en faisceaux concordants avec la schistosité. Un tel faisceau, très fracturé, apparaît en particulier immédiatement au nord des sources de Zagat et son pendage de  $20^\circ$  vers le sud l'amène très probablement à passer, en profondeur, sous celle de Chassole.

## Les structures profondes : l'apport de la géophysique

Le Cézallier est situé au cœur d'une région de croûte amincie qui, d'après les résultats des grands profils de sismique réfraction (Hirn, 1980) serait centrée sur la Limagne et se prolongerait vers le NE pour rejoindre le fossé rhénan.

Dans le Cézallier, le Moho se trouve à une profondeur de l'ordre de 27 km sous la surface du sol.

Ce secteur correspondrait également à une région de manteau anormal caractérisé par une faible vitesse entre 70 et 240 km de profondeur (A. Souriau, 1976).

Le Massif central se caractérise, du point de vue gravimétrique, par une importante anomalie de Bouguer négative, atteignant  $-60$  mGal, et ceci en dépit de l'amincissement de la croûte, moins dense que le manteau. Cette anomalie ne peut s'expliquer que par la présence dans la partie supérieure du manteau d'une zone anormalement légère (Perrier et Ruegg, 1973). Ce «diapir mantellique» résulterait, selon Lucaleau et Bayer, (1962), d'une réactivation crustale ayant débuté vers  $-25$  à  $-40$  MA. Il aurait un allongement moyen NNW-SSE et serait en bonne concordance avec la zone à faible vitesse, beaucoup plus profonde, mentionnée ci-dessus, et avec les manifestations volcaniques récentes.

On ne peut évidemment manquer de rapprocher cette remontée mantellique des indices de surrection du socle mis en évidence par la néotectonique.

Les levés gravimétriques détaillés réalisés dans le cadre du programme GPF ont donné lieu d'une part à une analyse structurale par cartes transformées (gradient vertical) (Debelia et Mennechet), et d'autre part à une modélisation permettant de prolonger en profondeur les structures observées en surface (Vidal, Vasseur et Bayer).

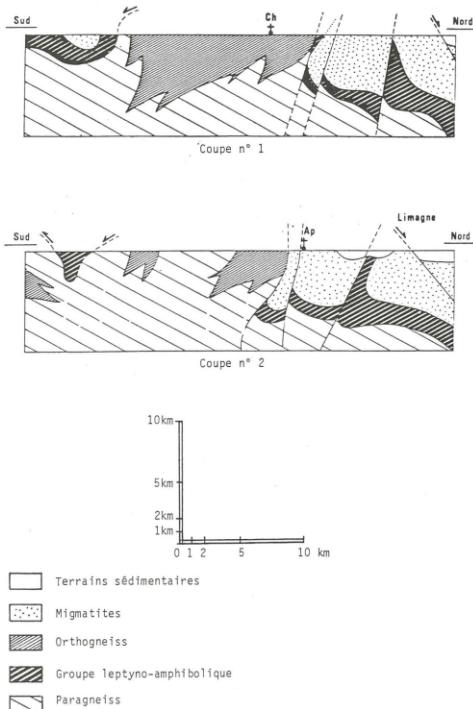


Fig. 6. - Coupes géologiques interprétatives déduites de la modélisation gravimétrique (Vidal, Vasseur, Bayer, 1985) (voir localisation sur fig. 2. Ch : Chassole, Ap : Apchat)  
Interpretative geological cross-sections based on gravimetric modelling

Les conclusions les plus importantes que l'on peut tirer de cette modélisation, illustrée par les coupes interprétatives de la figure 6, sont les suivantes :

- l'orthogneiss de Saint-Alyre est épais de 2 à 4 km dans la zone de Chassole, mais son épaisseur diminue rapidement vers l'est ;
- le groupe leptyno-amphibolique est fortement enraciné sous les migmatites, où il peut présenter des épaisseurs importantes, en particulier dans la partie nord du Cézallier. Sa structure très plissée, avec évolution de certains plis en décrochements, semble confirmée par la modélisation ;
- il existe au sud, dans la région de Molompize, des zones denses dont la signification n'est pour l'instant pas connue, entre la surface et 4 km de profondeur.

L'analyse structurale, pour sa part, montre que la zone de Chassole-Zagat est caractérisée par la présence d'une discontinuité gravimétrique E-W recouvrant la zone d'émergence des sources de Zagat, et qui correspond à un linéament parfaitement visible en photographie aérienne, ainsi qu'à une anomalie conductrice superficielle en audio-magnétotellurique (voir ci-après).

Quant à la source Saint-Marguerite à Chassole, elle se trouve à l'extrême ouest d'une structure à contraste négatif (légère) d'axe WNW-ESE, cette direction étant celle de l'axe de l'antiforme de Massiac.

L'analyse de la carte du champ magnétique existante fait surtout ressortir l'influence du groupe leptyno-amphibolique (Van de Meulebrouck et al.).

Plusieurs campagnes de sondages magnétotelluriques (MT basse fréquence et audio-MT) ont été réalisées dans le Cézallier, en vue de localiser des conducteurs électriques en profondeur, ces conducteurs pouvant correspondre à des zones faillées plus ou moins remplies d'argile, de minéraux conducteurs, voire de fluides minéralisés (Pham Van Ngoc et al., M. Aucel et al., M. Fabriol).

Le trop petit nombre de points de mesure (sauf, pour l'AMT, dans le secteur de Chassole-Zagat) et les difficultés d'interprétation de la méthode limitent la portée des conclusions que l'on peut tirer des mesures réalisées.

Néanmoins, il semble que l'on puisse retenir comme vraisemblable l'hypothèse d'une remontée, à moins de 20 km de profondeur, du toit d'un conducteur profond (assimilé au Moho ?) dans la région Autrac - Apchat - Mazoires.

La MTBF indique, pratiquement dans toute la zone d'étude, la présence d'un conducteur intermédiaire, vers 500 à 1 000 m de profondeur. Ce conducteur n'est pas confirmé par l'AMT ; cette dernière met simplement en évidence quelques conducteurs locaux d'extension limitée dans cette gamme de profondeurs.

Enfin, vers la zone de Chassole, l'AMT, mise en œuvre dans ce secteur avec une forte densité de points de mesure, met en lumière l'existence de trois axes conducteurs, caractérisés par une profondeur du toit des terrains résistants supérieure à 500 m. Deux de ces axes présentent une orientation WNW-ESE et le troisième une direction NNE-SSW, et leurs intersections correspondent aux aires d'émergence des sources de Zagat et de Chassole. A noter également que deux de ces axes correspondent à des accidents identifiés sur photographies aériennes et confirmés par les observations de terrain.

Une série de sondages électriques réalisés suivant un alignement N-S et recoupant les deux axes W-E mentionnés ci-dessus confirme bien leur existence. Elle montre par ailleurs que l'ensemble des terrains, même en dehors de ces axes, est relativement conducteur (150 à 300  $\Omega$  m), ce qui traduit une fracturation et une imbrication importantes (Valentin).

Un résistant relatif (500  $\Omega$  m) n'apparaît qu'à partir d'une profondeur de l'ordre de 300 mètres.

## Les sources minérales : les apports de la géochimie des fluides

(C. Fouillac et al., G. Michard et al.)

Les émergences d'eaux bicarbonatées-sodiques du Cézallier s'étendent du nord au sud, sur une distance de 25 km, dans un couloir d'une quinzaine de kilomètres de large (fig. 4). Il est intéressant de noter que, sauf rares exceptions, elles apparaissent soit dans les migmatites, soit dans les orthogneiss, mais pas dans les paragneiss. Ceci est peut-être lié à la moindre fracturation de ces derniers. Plus de quarante émergences ont été inventoriées ; la plupart ont fait l'objet de prélèvements et d'analyses. Les températures d'émergence sont froides, les débits très faibles. Plusieurs sources présentent des dégagements gazeux importants et certaines ont donné lieu à l'édification de massifs de travertins qui peuvent être très développés. Ces travertins sont récents et ont été déposés par des eaux froides (A. M. Fouillac). Le tableau ci-dessous donne la composition de la source Sainte-Marguerite à Chassole.

*Analyse chimique de l'eau de la source Sainte-Marguerite à Chassole (prélèvement : août 1984) (analyses réalisées par l'Institut Mixte de Recherches Géothermiques, Orléans)*

Temp.	10,2 °C	Li	5,9 mg/l
pH	6,39	Sr	2,4 mg/l
Eh	-129 mV	F	0,43 mg/l
		B	2,2 mg/l
<hr/>			
Na	1 015 mg/l	SiO <sub>2</sub>	72 mg/l
K	124 mg/l	Al	0,081 mg/l
Ca	220 mg/l	As	0,36 mg/l
Mg	79 mg/l	Fe	4,7 mg/l
HCO <sub>3</sub>	3 228 mg/l	Mn	0,16 mg/l
Cl	384 mg/l		
SO <sub>4</sub>	48 mg/l		

Certaines des sources ont fait l'objet de prélèvements et d'analyses à des dates différentes. Ces analyses font apparaître des modifications de composition plus ou moins importantes qui témoignent de mélanges avec les eaux superficielles. La composition des eaux des sources du Cézallier amène à considérer qu'elles appartiennent toutes au même système géothermal.

A l'intérieur de ce système ont été identifiés, sur la base de critères chimiques et isotopiques, quatre groupes de sources différents, au sein de chacun desquels les rapports de concentration des différents éléments (Na-CI, Na-K, Na-Mg, Ca-Mg, Ca-Ca, mais également Cl-SO<sub>4</sub>, Cl-As, Cl-B, Cl-Br, Cl-I) restent très homogènes.

Ces quatre groupes sont, du nord au sud, le groupe de Saint-Hérent, le groupe de Chassole, le groupe de Chantelail et le groupe de Conches – Pyronnée (fig. 4). De ces quatre groupes, c'est celui de Chassole qui présente les caractéristiques les plus constantes d'une source à l'autre.

Il est intéressant de constater que si l'on ne peut établir de relation simple entre les points d'émergence et des situations structurales particulières, par contre les limites des groupes de sources correspondent assez bien avec les limites de blocs délimités par de grands accidents cassants mis en évidence par l'étude structurale.

Peut-on pour autant en conclure que ces groupes correspondent à des systèmes aquifères profonds qui, tout en appartenant au même ensemble, seraient distincts les uns des autres ? Une réponse à cette question serait certainement prémature à l'heure actuelle.

Les grands accidents qui délimitent les blocs sont marqués par des couloirs de fracturation qui en font des zones dont la perméabilité est très probablement bien supérieure à celle du reste du socle. Les circulations d'eaux sub-superficielles ont donc de grandes chances d'être particulièrement importantes dans ces zones et d'y empêcher toute expression en surface de remontées d'eaux minérales profondes ; au contraire, à l'intérieur des blocs, la fracturation moins intense des terrains peut ménager des zones où des conduits favorisent la remontée d'eaux profondes jusqu'à des niveaux très proches de la surface sans contamination par les eaux superficielles, cette contamination intervenant suffisamment tard pour ne pas occulter la manifestation en surface de cette remontée.

Dans cette hypothèse, les quatre groupes de sources que la géochimie amène à distinguer correspondraient à un seul et même système aquifère profond dont les caractéristiques évolueraient de façon continue dans l'espace.

Les interprétations géothermométriques (cations : Na-K, Na-Li, Na-K-Ca ; silice,  $^{180}\text{O}$  des sulfates), une fois résolus un certain nombre de problèmes de méthode trouvant essentiellement leur origine dans la contamination des eaux de source par des eaux moins profondes, montrent que les eaux minérales ont connu, au cours de leur parcours souterrain, des températures de l'ordre de  $130^{\circ}\text{C}$  pour le groupe de Conches, et de  $200^{\circ}\text{C}$  pour les groupes de Chantelail, Chassole et Saint-Hérent.

Les eaux du groupe de Saint-Hérent, que certains géothermomètres à cations donnent comme les plus chaudes de toutes, semblent en fait connaître des perturbations significatives, caractérisées en particulier par un apport de potassium, lors de leur remontée. Il n'est pas exclu que ces perturbations soient liées à la proximité de la faille de Limagne et à des interférences avec des circulations en relation avec cette dernière.

Des déterminations du rapport  $^{3}\text{He}/^{4}\text{He}$  dans les eaux de deux sources du système hydrominéral du Cézallier, réalisées par l'équipe de R. Oxburgh et K. O'Nions (Université de Cambridge ; résultats non publiés), ont donné des valeurs très élevées, de l'ordre de celles que l'on rencontre dans les zones géothermales de haute énergie. Ces valeurs témoignent d'un apport d'hélium mantellique pouvant atteindre 50 % du flux d'hélium total. Ce résultat semble en contradiction avec le caractère très discret des manifestations hydrothermales de surface. Cette contradiction apparente amène à supposer soit l'existence d'un colmatage quasi étanche pour un système géothermal à profondeur moyenne, soit un système assez profond.

## Le gradient géothermique dans le Cézallier : mesures superficielles

Les mesures de gradient géothermique effectuées dans le Cézallier dans cinq sondages peu profonds (moins de 200 m) (Vidal, Vasseur et Lucazeau), ont donné des valeurs corrigées des effets topographiques allant de  $43,22^{\circ}\text{C}/\text{km}$  à Chassole, à  $24,90^{\circ}\text{C}/\text{km}$  à Apchat, 4 km seulement à l'E-NE de Chassole. Les valeurs de flux, calculées sur la base de ces mesures et des conductivités thermiques des roches mesurées en laboratoire sont comprises entre 128 et  $72 \text{ mW/m}^2$ , les chiffres les plus élevés correspondant à l'autochtone et les plus faibles à l'alluvion.

La correction des effets paléoclimatiques (glaciation de Würm, simulée par un créneau de température négatif de  $-6^{\circ}\text{C}$  à la surface du sol, de  $-70\,000$  à  $-15\,000$  ans) amène à augmenter les températures mesurées des quantités suivantes :

Profondeur	$\Delta \theta$
50 m	$0,13^{\circ}$
100 m	$0,25^{\circ}$
150 m	$0,37^{\circ}$
200 m	$0,50^{\circ}$
500 m	$1,17^{\circ}$
1 000 m	$1,93^{\circ}$
1 500 m	$2,13^{\circ}$
2 000 m	$1,89^{\circ}$
2 500 m	$1,46^{\circ}$

On voit que cette correction est peu importante, et en tous cas très inférieure aux écarts entre les mesures effectuées dans les différents sondages.

Si on choisit malgré tout de l'appliquer, on constate que les gradients géothermiques corrigés des effets paléoclimatiques varient de  $45,72^{\circ}\text{C}/\text{km}$  à  $27,40^{\circ}\text{C}/\text{km}$ , valeurs qui restent modérées, mais qui, même si elles sont marquées par l'influence perturbatrice des circulations d'eau sub-superficielles dont on a vu qu'elles pouvaient être localement importantes, représentent probablement une « fourchette » à l'intérieur de laquelle doit se situer la valeur du gradient en profondeur.

## Les objectifs et le programme des forages

L'état des connaissances au début de 1985, tel qu'il vient d'être brièvement rappelé, confirmait l'intérêt du Cézallier en tant que « cible » pour des forages visant à étudier un système hydrothermal actif.

Les investigations réalisées avaient même permis, sur la base d'arguments structuraux, hydrogéo chimiques et géophysiques, de sélectionner une zone particulièrement favorable pour l'implantation de ces forages : la zone de Chassole-Zagat.

Les plus grandes facilités présentées pour l'installation du chantier par le site de la source Sainte-Marguerite à Chassole et la présence sur ce site d'un forage peu profond, P1, pouvant servir de piézomètre devaient déterminer le choix de ce site. Sa localisation précise est donnée figure 7.

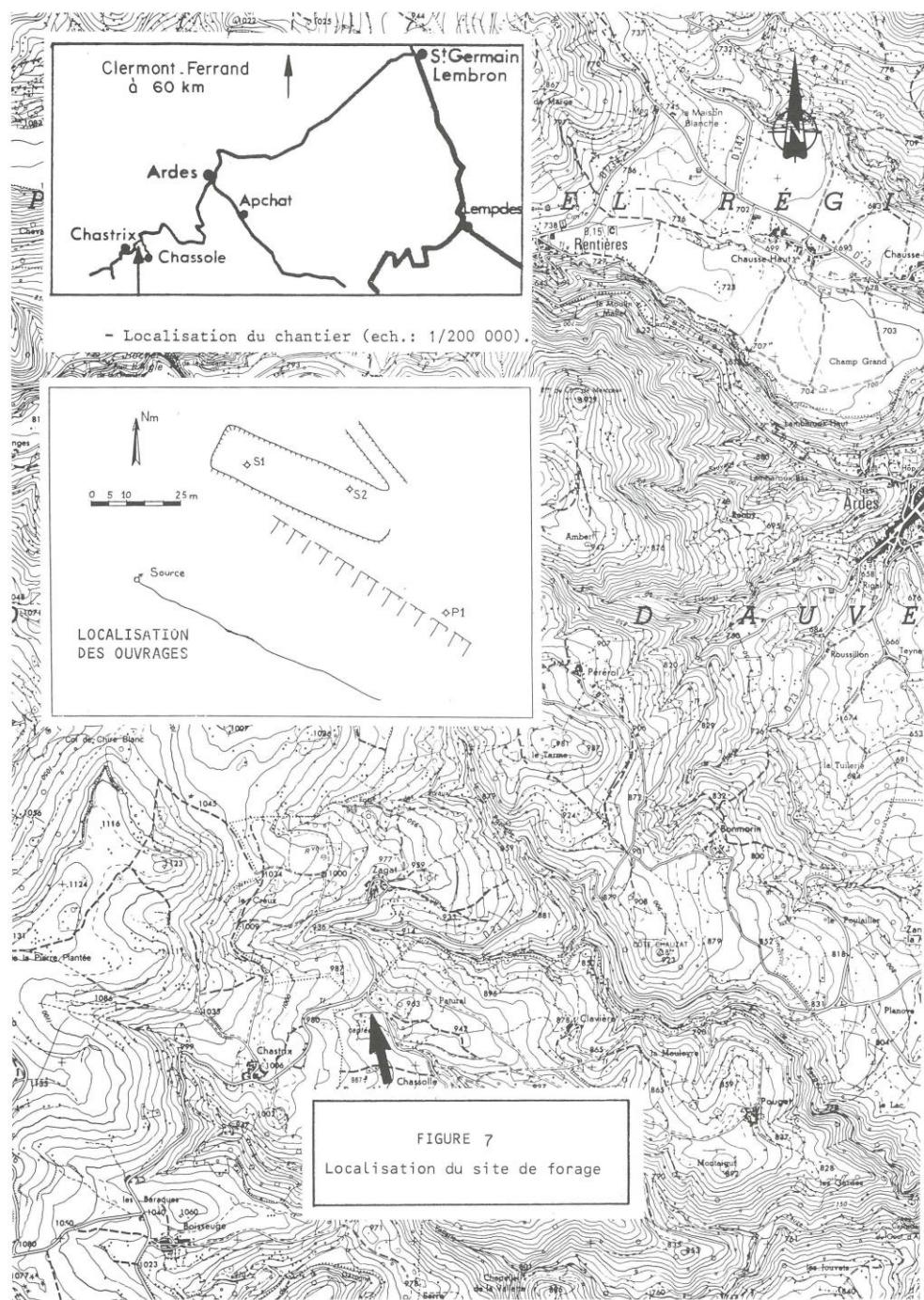


Fig. 7. — Échelle 1/25 000 — Localisation du site de forage  
Location of the Chassole boreholes — (*«source»* : spring)

Les deux objectifs prioritaires assignés aux forages étaient :

- de mesurer le gradient géothermique en profondeur, pour s'affranchir des perturbations dues aux circulations superficielles ;
- de prélever des eaux profondes, en-dessous de leur zone de mélange avec les eaux superficielles, aux fins d'analyse.

Des objectifs annexes portaient sur l'étude de la structure du socle (mise en place et fracturation) et des produits d'origine hydrothermale, l'hydrogéologie, la mesure des contraintes, la caractérisation physique des terrains.

Deux forages ont été réalisés à 30 m l'un de l'autre sur le site de Chassole de juillet à novembre 1985 (fig. 7). Le premier, S1, de 500 m de profondeur, a été creusé au marteau fond de trou et a permis des prélèvements d'eau et de gaz de bonne qualité, au cours des opérations de forage ou pendant des pompages d'essai. Le second, S2, de 1 400 m de profondeur, entièrement carotté, a fourni un matériau d'excellente qualité pour les études pétrographiques et structurales. Il a recoupé plusieurs niveaux fracturés perméables qu'il a été possible de caractériser avec précision aussi bien du point de vue hydrodynamique que géochimique.

Les travaux de forage ont fait l'objet d'un suivi scientifique continu par une équipe présente en permanence sur le chantier.

Ils ont comporté les opérations suivantes :

- suivi hydrologique et hydrogéologique du chantier : mesure des paramètres météorologiques (pression atmosphérique, précipitations, températures), suivi de la source Sainte-Marguerite (débit, température, conductivité électrique) et des niveaux d'eau dans les forages ; suivi hydrogéologique de la foration (mesure des débits, quand c'était possible) ; réalisation de pompages d'essai et de mesures au micromoulinet pour localiser et caractériser les niveaux aquifères éventuels à différents stades de l'avancement des forages ;
- orientation des carottes (en vue de l'établissement du profil structural) et mesures de déviation des forages ;
- suivi pétrographique et structural des forages : prélèvement des débris et établissement du profil pétrographique pour le forage destructif ; établissement du profil pétrographique (à partir d'observations macroscopiques) et du profil structural (structures cassantes et souples) pour les parties carottées ; réalisation d'un petit nombre de lames minces pétrographiques et structurales et d'analyses chimiques ;
- identification des différents types d'altérations ou de produits d'origine hydrothermale ;
- suivi hydrogéochemique de la foration et des essais hydrauliques : suivi des caractéristiques physiques du fluide de forage et analyses chimiques régulières de celui-ci (eau et gaz) en vue de détecter d'éventuels indices annonciateurs de la traversée de zones aquifères. Suivi de l'évolution des caractéristiques physico-chimiques des fluides pompés à l'occasion des essais hydrauliques.
- Prélèvements en forages aux niveaux jugés les plus intéressants. Ce suivi a été complété par un petit nombre d'analyses isotopiques et d'analyses chimiques plus complètes que celles effectuées sur le chantier.

- diagraphies - ces diagraphies avaient pour objectifs, dans le forage destructif, de suppléer à l'absence de carottes, en particulier pour ce qui est de la connaissance de la fracturation et, dans les deux forages, de recueillir des informations sur le terrain à faible distance des parois ;
- thermographies, en déséquilibre pour localiser les zones de circulation d'eau et à l'équilibre pour mesurer le gradient thermique ;
- suivi régulier, pendant toute la durée du chantier, de six sources minérales de la région afin d'évaluer l'incidence éventuelle des travaux de forage sur leur régime.

## Principales observations scientifiques faites pendant le chantier

Le forage S2 a recoupé quatre niveaux aquifères importants : à 442-447 m, 692-697 m, 825 m et 956 m. Le plus important d'entre eux (692-697 m) a fourni en pompage un débit stabilisé de 5 m<sup>3</sup>/h pour un rabattement de 6 m.

Le suivi des niveaux d'eau dans les sondages S1, S2 et P1 pendant toute la durée du chantier a permis de mettre en évidence des relations hydrauliques entre sondages dans la tranche 0-200 m, puis en-dessous de 300 m, la tranche 200-300 m semblant à l'échelle du site, jouer un rôle d'imperméable.

La température, le débit et la conductivité électrique de la source de Chassole n'ont connu aucun changement de régime qui puisse être imputé aux travaux du chantier, tandis que le niveau piézométrique (charge hydraulique) dans les forages décroissait avec la profondeur, jusqu'à environ 500 mètres.

Les profils thermométriques montrent au droit des niveaux aquifères des anomalies très nettes. Il est probable que les circulations dont elles témoignent perturbent les mesures du gradient géothermique. Celui-ci passe de 4 °C/100 m sur les 200 premiers mètres à 3 °C/100 m en-dessous de 1 000 m, zone exempte de circulations.

Les observations hydrogéoéologiques, mettant en évidence une très grande indépendance entre le circuit alimentant la source minérale de Chassole et le système aquifère recoupé par les sondages, auraient pu faire penser que les eaux de l'un et de l'autre sont différentes. Or on a constaté qu'il n'en était rien. Les deux eaux sont de même type, et à partir de 700 m, la minéralisation des échantillons prélevés en sondage dépasse légèrement celle de la source.

Du point de vue géologique, les sondages sont restés entièrement dans « l'orthogneiss de Saint-Alyre ». L'orthogneiss présent, sur les carottes, des enclaves de paragneiss et des niveaux de méta-aplites et métadiorites. Tous ces matériaux peuvent localement être affectés par l'anatexie. Une hydrothermalisation intense affecte ces formations. Plusieurs événements hydrothermaux successifs caractérisés par des températures décroissantes ont été identifiés.

La fracturation, très intense, est surtout représentée par des diaclases et filons leucocrates post-métamorphiques, mais plusieurs failles importantes, marquées par des brèches argilées, silicifiées ou à ciment de sidérite ont également été recoupées. Les failles et fractures à ouverture libre, propices aux écoulements, représentent 3,5 % de l'ensemble des cassures et se répartissent en quatre familles principales, dont il a été montré qu'elles avaient été actives au Quaternaire.

## Conclusion

La présente note ayant principalement pour objet de fournir un cadre permettant de situer les résultats scientifiques tirés de l'étude détaillée des matériaux « bruts » fournis par le chantier, elle ne nécessite pas vraiment une conclusion.

Une évaluation des travaux réalisés sur le chantier doit par contre être tentée. Cette évaluation peut revêtir un aspect essentiellement technique, en cherchant à répondre à la question de savoir si les opérations réalisées ont effectivement permis d'obtenir les données souhaitées. Elle peut également revêtir un aspect scientifique : dans ce cas, il s'agit de savoir si le programme de travaux et d'études mis en œuvre a permis, sinon de résoudre le problème posé, du moins de progresser significativement dans la connaissance et la compréhension des phénomènes en jeu.

L'examen des articles qui suivent permettra au lecteur de se forger une opinion sur ce point ; qu'il soit simplement permis à l'auteur de cette note de remarquer qu'il est désormais possible de proposer un modèle cohérent, même s'il est incomplet, de l'historique et du fonctionnement du système géothermal du Cézallier.

Quant à l'adéquation des moyens techniques mis en œuvre à l'obtention des données souhaitées, il faut noter d'abord que le choix des paramètres à mesurer reposait sur un modèle *a priori*. Dans la mesure où ce modèle s'est révélé ne pas être tout à fait exact, il est normal que certaines données n'aient pas pu être acquises ; c'est le cas en premier lieu d'une évaluation du gradient géothermique non influencée par les circulations d'eau. Ceci étant, au regard des résultats obtenus, on peut conclure d'une part que les investigations préliminaires ont conduit à sélectionner un site satisfaisant, puisque des eaux profondes ont pu être échantillonnes en quantité dans les forages, et que la conception des forages et de leurs travaux d'accompagnement a permis de recueillir pratiquement toutes les données souhaitées. Il convient à cet égard de souligner l'apport fondamental du carottage, qui a permis en particulier des études de la fracturation d'une part et des altérations hydrothermales d'autre part dont l'importance, comme on le verra dans les notes qui suivent, est tout à fait fondamentale pour la compréhension du système.

Dans le cas où il n'aurait été possible de ne réaliser qu'un seul sondage sur le site de Chassole, on peut dire, au vu de l'expérience acquise, que la solution optimale aurait certainement été celle d'un sondage carotté avec suivi hydrogéologique et hydrogéo chimique continu, la foration étant interrompue juste après la traversée des niveaux aquifères pour permettre la réalisation de tests hydrauliques et de prélèvements de fluides représentatifs.

## REMERCIEMENTS

L'auteur de cette note — et de la synthèse qui clôt cette revue — n'aurait pu s'acquitter de sa tâche de chef de projet sans la confiance que lui ont témoignée les responsables du programme GPF et sans l'appui compétent et dévoué de tous ceux — scientifiques, ingénieurs, techniciens, gestionnaires et sondeurs — qui ont participé aux différents stades du projet. Que tous trouvent ici l'expression de sa gratitude.

## Bibliographie

### Rapports et comptes-rendus édités dans la série « documents du BRGM »

- Programme Géologie Profonde de la France (1982) Colloque national, Paris, 15 juin 1982. Documents du BRGM n° 39 (Communications) et n° 40 (Rapports généraux et comptes-rendus).
- Programme Géologie Profonde de la France (1984) Première phase d'investigation : 1983-1984. Colloque national, Paris, 19-20 septembre 1984 - Rapports généraux et communications. Thème 10 - Géothermalisme actuel (Cézallier). Documents du BRGM n° 81-10.
- Programme Géologie Profonde de la France. Deuxième phase d'investigation : 1984-1985. GPF 2 - Thème 10 - Géothermalisme actuel (Cézallier). Documents du BRGM n° 95-10.
- Programme Géologie Profonde de la France. Troisième phase d'investigation : 1985-1986. GPF 3 - Thème 10 - Géothermalisme actuel (Cézallier). Forages du Cézallier. Résultats préliminaires - Documents du BRGM n° 105.

### Références

- BURG J.-P. (1977). — Tectonique et microtectonique des séries cristallophylliennes du Haut Allier et de la vallée de la Truyère. Contribution du microscope électronique à transmission à l'étude de la déformation des minéraux dans les zones profondes. Thèse 3<sup>e</sup> cycle - Montpellier.
- ELLIS A.-J., MAHON W.-A.-J. (1977). — Chemistry and Geothermal Systems - Academic press - New York.
- FORESTIER H. (1961). — Métamorphisme hercynien et anté-hercynien dans le bassin du Haut-Allier. Thèse État - Clermont-Ferrand.
- FOURNIER R.-O. (1983). — Active hydrothermal systems as analogues of fossil systems. Geothermal Resources Council, Special report n° 13, May 1983, pp. 263-284.
- HENLEY R.-W., ELLIS A.-J. (1983). — Geothermal systems ancient and modern : A geochemical review. *Earth - Science Review*, 19, pp. 1-50.
- HIRNA (1980). — Image géophysique de la France : le cadre structural profond d'après les profils sismiques, in *Evolutions géologiques de la France*. Éd. par A. Autran et J. Dercourt; 26<sup>e</sup> Congr. géol. int. Colloque C7. Mémoires BRGM, Fr. n° 107.
- LASNIE B., MARCHAND J. (1982). — Notice explicative de la feuille de Brioude à 1/50 000. Éditions du BRGM Orléans.
- LUCAZEAU F., BAYER R. (1982). — Évolution géothermique et géodynamique du Massif central français depuis l'Oligocène. *Ann. Géophys.* 38, n° 3, pp. 405-423.
- MAHON W.-A.-J., MC DOWELL G.-D., FINLAYSON J.-B. (1980). — Carbon dioxide : Its role in geothermal systems. *New Zealand Journal of Science*, 23, pp. 133-148.
- MARINER R.-H., PRESSER T.-S., EVANS W.-C. (1983). — Geochemistry of active geothermal systems in the northern Basin and Range province. Geothermal Resources Council, Special report n° 13, May 1983, pp. 95-119.
- MATHONNAT M. (1983). — La série métamorphique du Cézallier. Thèse de 3<sup>e</sup> cycle - Clermont-Ferrand.
- PERRIER G., RUEGG J.-C. (1973). — Structure profonde du Massif central français. *Ann. géophys.*, 29, n° 4, pp. 435-502.
- SOURIAU A. (1976). — Structure profonde sous la France obtenue à partir des ondes de surface. *Bull. Soc. géol. Fr.*, (7), 18, n° 5, pp. 1085-1093.