

## Interprétation des mesures géothermiques dans les forages de Chassolle (Cézallier)

G. Vasseur\*, G. Bienfait\*\*, M. Cuney\*\*\*, R. Gable\*\*\*\*,  
J. Jolivet\*\*, F. Lucazeau\*

Mots-clés : Diagraphie température, Conductivité thermique, Flux géothermique, Système géothermique, Hydrodynamique, Puy-de-Dôme (Chassolle).

### Résumé

Les résultats des diverses mesures thermiques effectuées dans les forages de Chassolle sont présentés. Les diagraphies thermiques réalisées juste après l'achèvement des travaux et après une période de repos d'un mois montrent de multiples perturbations de courtes longueurs d'onde qui sont associées à des venues d'eau chaude ou froide le long des zones de fracture. Ces oscillations, engendrées par la réalisation du forage, se superposent à une décroissance régulière de la valeur moyenne du gradient avec la profondeur. La conductivité thermique a été déterminée sur 58 échantillons ; les valeurs moyennes obtenues selon l'axe du forage sont relativement faibles ( $2.5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ), et liées à une forte anisotropie minéralogique conjuguée à un faible pendage de la formation. La production de chaleur, évaluée sur 18 échantillons, fournit des valeurs très cohérentes ( $2 \mu \text{ Wm}^{-3}$ ). Le profil détaillé du flux de chaleur corrigé des effets paléoclimatiques et de production de chaleur présente une décroissance entre 200 et 1400 m dans le forage S2, à laquelle se superpose une oscillation de grande amplitude vers 800 m. La première tendance est interprétée par une remontée verticale d'eau chaude affectant l'ensemble du massif alors que la seconde est liée à des venues sub-horizontales d'eau chaude. Ces deux phénomènes, nécessairement transitoires, seraient caractérisés par des constantes de temps respectives de 30000 et 400 ans.

### Abstract

*Interpretation of temperature and thermal conductivity measurements  
in the Chassolle borehole (Cézallier)*

Thermal measurements have been carried out in various boreholes of Chassolle. Thermal logs obtained just after borehole completion and one month later indicate several short wavelength fluctuations due to cold or hot water circulations along fracture zones. The average thermal gradient continuously decreases with depth. Thermal conductivity was measured in the direction of the borehole for 58 samples. The low value obtained for the orthogneiss ( $2.5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ) is explained by the strong anisotropy. Heat generation, determined on 18 samples, is characterized by homogeneous values (around  $2 \mu \text{ Wm}^{-3}$ ). A detailed heat flow density profile in the S2 borehole presents a general decrease from surface to 1000 m and a large amplitude oscillation around 800 m. These observations could be related to two water circulation processes with different time scales : a regional upward circulation with a time constant of 30000 years and a localized sub-horizontal water flow at 800 m with a time constant of 400 years.

## 1. — Introduction

Les forages S1 et S2 de Chassolle, profonds respectivement de 500 et 1400 mètres, ont été réalisés afin de mieux comprendre un système géothermal en activité (Feuga, 1984 a). La présence de sources thermales dont les eaux ont été portées à  $200^\circ\text{C}$ , d'un flux élevé à l'échelle régionale (Vasseur, 1982) et à une échelle plus locale (Vidal *et al.*, 1984)

ainsi que l'existence d'un volcanisme récent ont guidé le choix de l'emplacement de ces forages (Berthier et Treuil, 1984).

Lors d'une phase préliminaire, un forage, P1, profond de 180 mètres, avait révélé un gradient de température anormalement fort (Vidal *et al.*, 1984) ; ce gradient, corrigé des effets liés aux irrégularités de la surface topographique, était de  $43.22^\circ\text{C/Km}$  soit environ 30 % plus élevé que dans les forages les plus proches.

\* Centre Géologique et Géophysique (CGG), Université des Sciences et Techniques du Languedoc, 4, place E. Bataillon, 34060 MONTPELLIER Cedex.

\*\* Institut de Physique du Globe (IPGP), 4, place Jussieu, 75252 Paris cedex 05.

\*\*\* Centre de Recherches sur la Géologie de l'Uranium (CREGU), BP 23, 54501 Vandœuvre-les-Nancy.

\*\*\*\* BRGM, Département de Géophysique, 45060 Orléans Cedex 2.

Toutefois, l'existence d'un système géothermal sous-jacent ne permettrait pas de considérer cette valeur comme représentative. Avec les forages profonds, une nouvelle phase d'étude pouvait commencer dans le double but :

— d'aider à la connaissance du système hydrothermal profond par la détermination du réseau de fractures naturelles ouvertes et réactivées par le sondage ;

— de tenter d'expliquer son fonctionnement par la connaissance de la distribution du flux et de la production de chaleur en profondeur par comparaison avec les valeurs voisines.

Ces deux objectifs ont nécessité plusieurs interventions sur le forage afin de connaître le profil de température immédiatement après l'arrêt des travaux et après une période de repos suffisamment longue, ainsi que des mesures de laboratoire pour déterminer la conductivité thermique et la production de chaleur. L'objectif de cette note est de synthétiser l'ensemble de ces travaux.

## 2. — Contexte géothermique

Le Massif central, région de socle hercynien, est caractérisé par une réactivation tertiaire avec la mise en place de grabens d'âge Oligocène (35-30 Ma) et un volcanisme d'âge Miocène à actuel (20-0 Ma). Cette activité superficielle peut être reliée à la montée d'un diapir asthénosphérique induit par la distension lithosphérique Oligocène ; les anomalies gravimétriques, topographiques et celles du flux de chaleur d'extension régionale (300 km) permettent d'argumenter cette hypothèse (Lucazeau et Bayer, 1982). La dernière synthèse des données de flux de chaleur en France (Vasseur, 1982) actualisé par Lucazeau et Vasseur (1987) montre que le Massif central est de toute évidence affecté par une valeur élevée, supérieure à 100 mWm<sup>-2</sup> (fig. 1) ; la région de Chassole se situe dans un contexte régional de 90-100 mWm<sup>-2</sup> en bordure de l'anomalie maximum. Le site de Chassole a fourni quant à lui une valeur très anormale (128 mWm<sup>-2</sup>) calculée d'après le fort gradient de température du forage superficiel P1 (Vidal et *al.*, 1984).

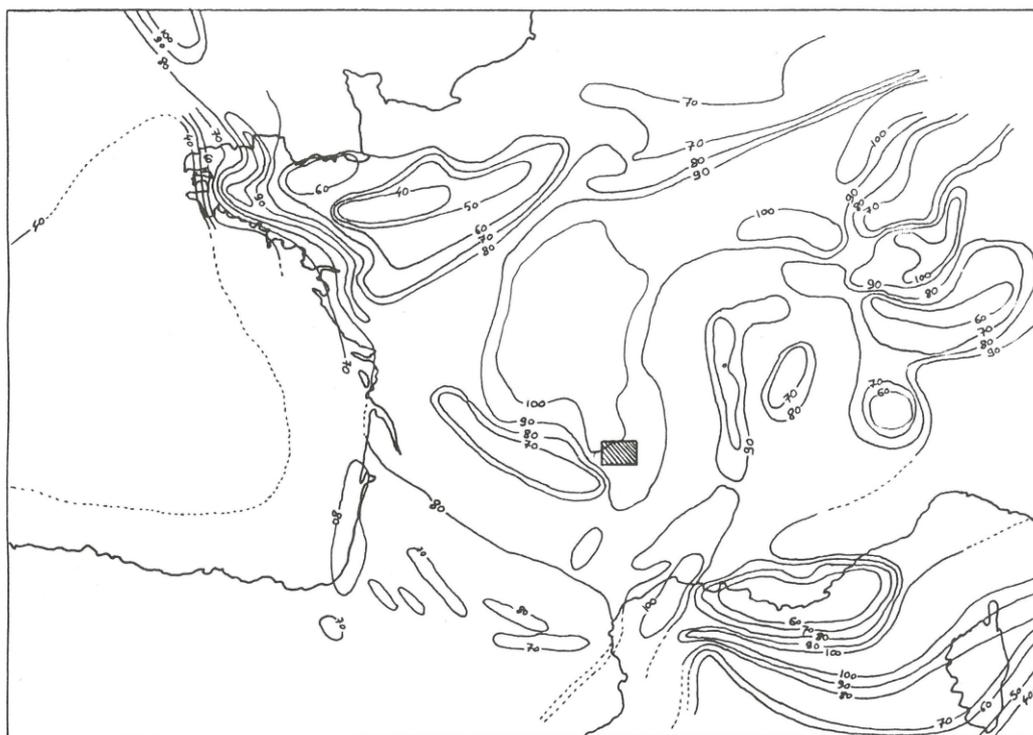


Fig. 1. — Carte du flux de chaleur en France et localisation de la zone d'étude (rectangle). Les isovaleurs sont en mWm<sup>-2</sup>.  
Heat flow map of France and location of the area under study.  
Isovalues are in mWm<sup>-2</sup>.

### 3. – Détection des fractures ouvertes à partir du profil thermique

Les arrivées de fluides, naturelles ou induites, permettent de détecter de manière efficace les fractures ouvertes (Drury, 1984). Dans le cas présent, l'hypothèse de base était que la boue de refroidissement, injectée sous pression lors de la réalisation du forage, pénétrait le réseau préexistant de fractures et pouvait être restituée ensuite. Si la diagraphie thermique était effectuée suffisamment tôt après l'achèvement des travaux, il serait possible de détecter les niveaux de restitution, l'équilibre thermique n'ayant pas eu le temps de se rétablir. En fait, il est probable que les anomalies de température que l'on a détectées au cours de ces expérimentations correspondent à la fois à ces restitutions et la réactivation de fractures naturelles.

Dans le forage S2, la diagraphie a été réalisée à peine 50 heures après l'arrêt des circulations de boue et à l'intérieur du train de tiges. Un certain nombre de venues d'eau ont été mis en évidence :

- 192 m venues d'eau chaude
- 256-258 m venues d'eau chaude
- 367-368 m venues d'eau chaude
- 450-540 m zone perturbée avec diverses venues d'eau
- 688-690 m venues d'eau froide

- 820 m venues d'eau froide
- 946-954 m importantes venues d'eau froide

La zone 1 000-1 400 m n'a pas été explorée.

Dans le forage S1, la diagraphie n'a été réalisée que 45 jours après l'arrêt des travaux et pendant l'exécution du forage S2. Seuls les niveaux de communication entre les forages ont été mis en évidence (Jolivet, 1985).

### 4. – Diagraphie thermique à l'équilibre

Elle a été faite après une période de repos de un mois, jugée trop courte initialement, mais qui apparaît aujourd'hui suffisante compte tenu des informations qu'elle apporte (Gable et Foucher, 1984). Les profils de température et de gradient de température sont reportés sur la figure 2. On peut noter la disparition des perturbations liées aux circulations situées au-dessus de 400 m mais leur persistance au dessous. L'agitation du gradient de température diminue avec la profondeur pour devenir remarquablement calme à partir de 900 m jusqu'au fond. Les zones perturbées sont les suivantes :

- 443 et 452 m venues d'eau chaude
- 695-725 m venues d'eau froide

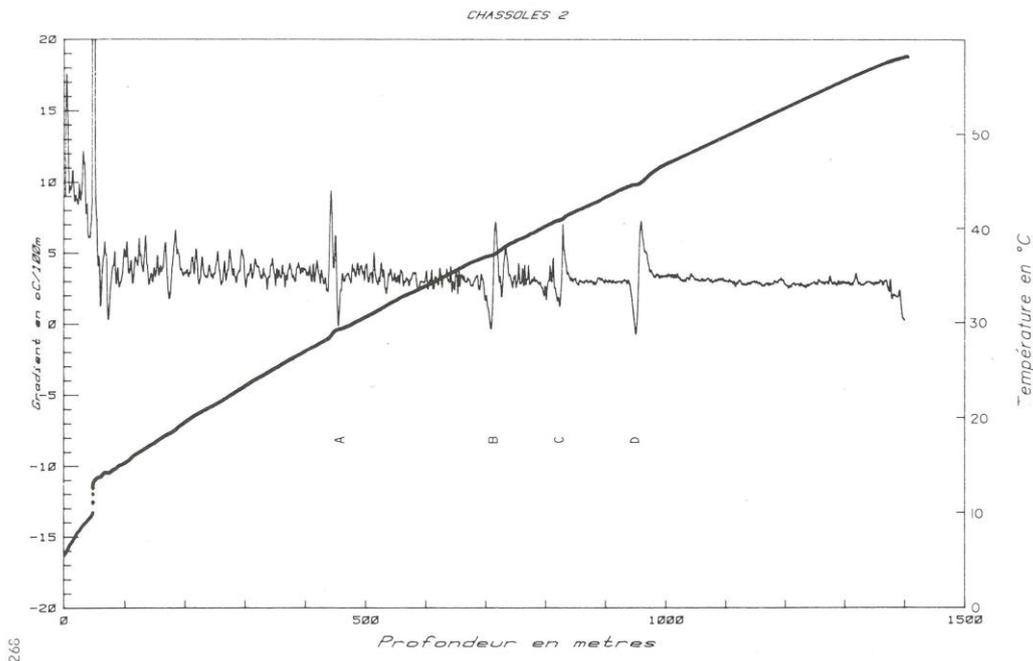


Fig. 2. – Diagraphie thermique du 17.12.1985 (forage S2).  
 Profil de température et de gradient.  
 Thermal diagraphy of December 17th, 1985 (borehole S2).  
 Temperatures and gradient profiles.

820-830 m zone perturbée

940-970 m venues d'eau froide

Si l'on fait abstraction de ces perturbations locales, on constate que le gradient de température moyen diminue avec la profondeur. De  $140^{\circ}\text{C}/\text{km}$  en surface, il diminue rapidement pour atteindre  $40^{\circ}\text{C}/\text{km}$  à 200 m, ce qui s'explique facilement par les fluctuations saisonnières de la température du sol. Il continue à diminuer ensuite :  $36^{\circ}\text{C}/\text{km}$  à 500 m de profondeur,  $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$  à 900 m et enfin  $25^{\circ}\text{C}/\text{km}$  en fond de trou. De 500 à 1 000 m, le gradient de température moyen est de  $34^{\circ}\text{C}/\text{km}$ , valeur légèrement inférieure à celle trouvée lors de la première intervention qui était de  $35^{\circ}\text{C}/\text{km}$  (Jolivet, 1985).

Pour interpréter cette diminution régulière du gradient de température, il convient au préalable de corriger le profil de température des effets des variations topographiques de la surface du sol autour du forage et des effets des variations de la température du sol au cours des quelque milliers d'années passées. Dans le cas de Chassole, la première correction est très négligeable comme l'ont montré Vidal et al., (1984). Les effets paléoclimatiques ont par contre été estimés à partir d'un modèle bibliographique de variation de la température du sol depuis l'Holocène (Vasseur, 1982); néanmoins, la diminution du gradient ne peut pas être expliquée par ce phénomène.

## 5. — Mesures de conductivité thermique

La conductivité thermique a été mesurée sur les carottes du forage S2 formées en majeure partie par l'orthogneiss de Saint-Alyre, sous ses différents faciès granulométriques. Cet orthogneiss est caractérisé par une foliation sévère sub-horizontale. Une telle roche présente une anisotropie de conductivité thermique, caractérisée par le rapport (supérieur ou égal à 1) entre la conductivité mesurée dans la direction parallèle à la foliation et la conductivité mesurée dans la direction perpendiculaire à celle-ci. La détermination de ce rapport a été effectuée grâce à l'appareil à barre divisée sur quelques échantillons du forage de Chassole taillés perpendiculairement et parallèlement à la direction de foliation. Les résultats sont reportés dans le tableau 1.

Roche	Profondeur (m)	$\lambda$ ( $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ )	$\lambda_{\perp}$ ( $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ )	Rapport d'anisotropie
Orthogneiss fin	918	3.16	2.07	1.52
Orthogneiss grossier	1015	3.04	2.20	1.38
Aplite	1015	3.31	3.02	1.10

Tabl. 1. — Rapport d'anisotropie.

L'orthogneiss se caractérise donc par une anisotropie très élevée, alors que les autres roches (aprites, granite d'anatexie...) montrent une anisotropie moins marquée, voire inexistante. Dans le cas présent, la conductivité qui nous intéresse est la conductivité dans la direction verticale (celle du flux).

Des mesures systématiques de la conductivité verticale  $\lambda_z$  (en fait dans la direction du forage) ont été réalisées sur 58 échantillons prélevés systématiquement tous les 20 m, de 200 m au fond du forage. Les résultats, détaillés en Annexe 1, sont résumés dans le tableau 2 sous forme de valeur moyenne par faciès.

Roche	Nbre	$\lambda_z$ ( $\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ )	Intervalle ( $\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ )
Orthogneiss fin normal	18	2.41	2.14-3.02
Orthogneiss fin plus ou moins altéré	14	2.69	2.16-3.22
Orthogneiss moyen	5	2.44	2.29-2.75
Orthogneiss grossier	17	2.35	2.01-2.94
Granites	3	3.21	3.17-3.23
Méta-aprites	3	2.95	2.74-3.12

Tabl. 2. — Conductivité verticale moyenne par faciès et intervalle obtenu

La valeur moyenne de la conductivité est faible ( $2.67\text{ W}/\text{Cm}$ ), mais conforme à ce qu'il est raisonnable d'attendre des gneiss. La dispersion des mesures est grande (2.01 - 3.23). Les roches les plus conductrices sont les granites d'anatexie, les plus résistantes, l'orthogneiss grossier.

Sur la figure 3, sont représentés simultanément la conductivité, l'angle de la foliation avec le plan horizontal et la densité, en fonction de la profondeur. De 200 m à 660 m, la densité et la conductivité sont bien corrélées. De 660 m à 800 m, le passage granitique plus conducteur se détache nettement. De 820 m à 1 100 m, se situe la partie la plus résistante du sondage; c'est aussi la zone où la foliation est la plus voisine de l'horizontale, donc où la conductivité minimum de l'orthogneiss est mesurée. De 1 100 m au fond du sondage, la variation de la conductivité semble plutôt liée à celle de la densité.

## 6. — Mesures de production de chaleur

Des mesures de concentration en U, Th, K ont été réalisées sur 18 échantillons par spectrophotométrie (Govindajara et al., 1976). La production de chaleur A est calculée à partir de ces concentrations par la relation (Birch, 1954) :

$$A = 0.097 \langle K \rangle + 0.261 \langle U \rangle + 0.072 \langle \text{Th} \rangle$$

où  $\langle U \rangle$  et  $\langle \text{Th} \rangle$  sont les concentrations exprimées en ppm,

$\langle K \rangle$  est exprimée en %,

A est donné en  $\text{Wm}^{-3}$ .

Les résultats sont détaillés dans l'Annexe II et résumés dans le tableau 3 pour les gneiss.

Roche	Nbre	<U> ppm	<Th> ppm	<Th/U>	<A> et intervalle $\mu\text{Wm}^{-3}$
Orthogneiss fin normal	5	3.16	12.42	4.06	1.99 (1.8-2.23)
Orthogneiss fin hydrothermalisé	2	3.20	10.61	3.4	1.85 (1.63-2.06)
Orthogneiss grossier	5	3.75	11.53	3.1	2.09 (1.62-3.14)
Orthogneiss moyen	3	3.69	11.36	3.1	2.05 (1.48-2.51)

Tabl. 3. — Production de chaleur moyenne

Les résultats sont très cohérents avec une dispersion faible, aussi bien pour les divers échantillons d'un même faciès que pour les divers faciès d'orthogneiss. Les rapports Th/U sont en général légèrement inférieurs à 4, ce qui traduit un faciès relativement riche en uranium par rapport au thorium. Trois échantillons seulement présentent un rapport nettement supérieur à 4 et correspondent à des valeurs en uranium légèrement plus faibles. La valeur moyenne ( $2.0\mu\text{Wm}^{-3}$ ) obtenue, est tout à fait conforme à ce qu'on

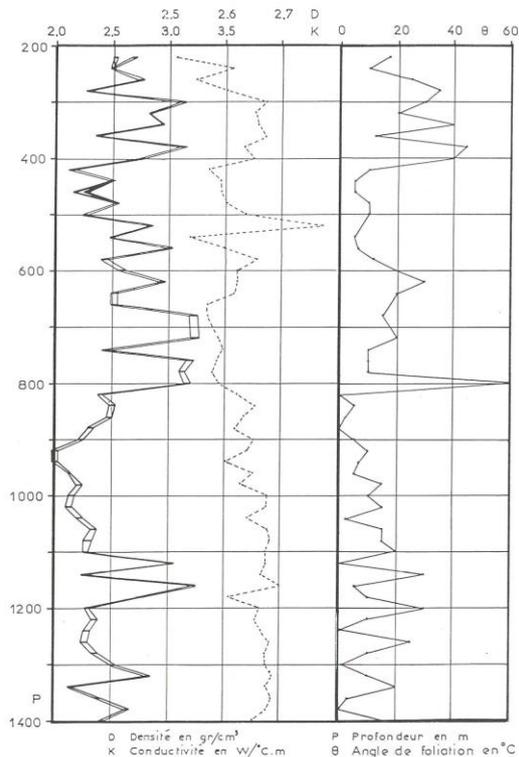


Fig. 3. — Conductivité thermique (courbe double en trait plein), densité (courbe en pointillés) et angle de la foliation avec un plan perpendiculaire à l'axe du forage, fonctions de la profondeur.  
Thermal conductivity (double heavy line), density (dotted line) and angle between the foliation and a plane perpendicular to the borehole axis versus depth.

attend pour ce type de roche : contrairement aux granites hercyniens et tardihercyniens, les orthogneiss cambrosiluriens du Massif central ont des teneurs assez faibles et assez homogènes en éléments radioactifs (Lucazeau et Vasseur, 1981). Il est intéressant de noter que les valeurs extrêmes de la production de chaleur correspondent à des pics sur le log de radioactivité naturelle (Lescop, 1985) ; il est ainsi possible de calibrer ce log pour obtenir un profil continu de la production de chaleur.

## 7. — Flux de chaleur

Le flux de chaleur apparent a été obtenu en divisant les terrains de 200 à 1400 m en intervalles de 20 m centrés sur les cotes arrondies où les conductivités ont été mesurées. Dans chacun de ces intervalles, on utilise la valeur moyenne du gradient mesuré. L'Annexe III donne les valeurs obtenues du flux brut, ainsi que les valeurs du flux apparent, corrigées de deux effets : l'effet paléoclimatique discuté plus haut et l'effet de la production de chaleur intégré entre la surface et le niveau considéré (de façon à ramener les valeurs à un niveau de référence : la valeur en surface).

L'effet de ces corrections est de + 9 mWm⁻² vers 200 m et de + 1,5 mWm⁻² en fond de trou. Le profil ainsi obtenu (fig. 4) présente des fluctuations de grande amplitude, qui reflètent les effets de l'échantillonnage sur les déterminations de la conductivité thermique et du gradient thermique (les fluctuations de petite échelle de ce dernier ont été décrites plus haut). Un lissage visuel permet de mettre en évidence une tendance à grande échelle avec une décroissance importante depuis le sommet (115 mWm⁻²) jusqu'au fond (72 mWm⁻²). Par rapport à cette tendance, on observe une fluctuation significative entre 600 et 1000 m, caractérisée par un effet dipolaire de 25 mWm⁻² d'amplitude environ.

Dans l'hypothèse de conduction pure pour une structure horizontale, le flux de chaleur devrait être constant. L'existence de contrastes latéraux de conductivité dans la masse rocheuse dont la structure précise est mal connue peut éventuellement entraîner des déviations de flux. Il est cependant improbable que ceci puisse expliquer l'amplitude des fluctuations observées. Les variations observées sont clairement associées à des circulations d'eau dans le milieu, circulations qui ont été mises en évidence par divers traceurs géochimiques.

## 8. — Discussion : Rôle des circulations

L'interprétation quantitative des observations de flux de chaleur et de gradient thermique en terme de circulation requiert la connaissance des débits affectant le massif rocheux, avant la réalisation du forage, ainsi que des perturbations apportées au régime hydraulique par le forage lui-même. En l'absence d'information quantitative de ce type, on peut toutefois utiliser des modèles simples de perturbation thermique due à des circulations, modèles appliqués au trois échelles de perturbation observées.

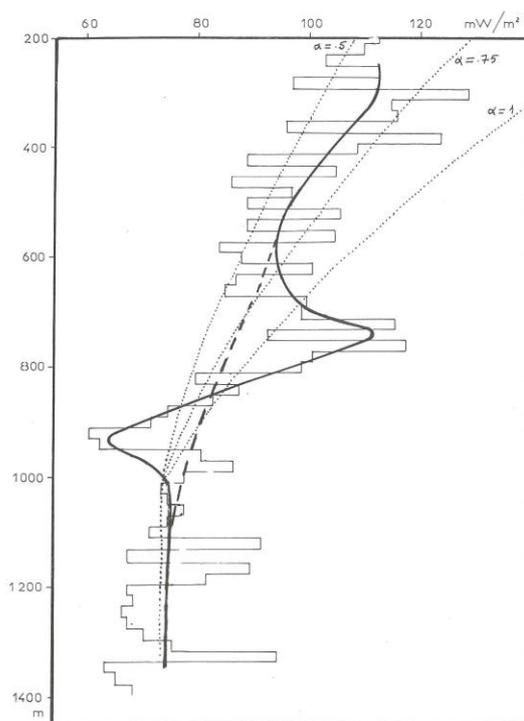


Fig. 4. — Profil de flux de chaleur calculé par tranche de 20 m. La courbe épaisse représente un profil lissé et les courbes en pointillés une interprétation en termes de percolation verticale en régime permanent (voir texte). Profile of the heat flow obtained within 20 m boxes. The thick line is a smoothed version and the dotted lines correspond to an interpretation in terms of steady state vertical circulation (see text).

La tendance générale de décroissance du flux conductif avec la profondeur peut être interprétée par un modèle de circulation verticale dans un milieu poreux. En régime permanent, l'équation de la chaleur s'écrit :

$$(\rho C) f V \frac{\partial T}{\partial z} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

où  $(\rho C)f$  est la capacité calorifique du fluide (eau),  $V$  sa vitesse de filtration et  $\lambda$  la conductivité thermique du milieu. Si on admet que le flux de chaleur observé à la base du forage représente le flux d'origine profonde,  $q_0$ , une circulation globalement ascendante dans la tranche  $0 \leq z \leq L$  correspond à un flux de chaleur apparent, donné par :

$$q(z) = q_0 \frac{\alpha}{L} (L - z)$$

où  $\alpha$  est le nombre de Peclet du milieu ( $\alpha = (\rho C) f V L / \lambda$ ). Sur la figure 4 sont reportés les profils  $q(z)$  pour  $L = 1000$  m et diverses valeurs de  $\alpha$ . Une valeur de  $\alpha$  comprise entre 0.5 et 1 rend compte de la tendance observée ; ceci correspond à une vitesse verticale ascendante de 1 cm/an, qui n'apparaît pas déraisonnable. Toutefois, ce modèle se heurte à des difficultés :

— La source de Chassole possède un débit de 0.025 l/s. Or, le débit correspondant à l'intégration d'une vitesse de 1 cm/

an sur une aire de 1 km seulement correspond à 0.3 l/s, chiffre 10 fois supérieur ; mais des émergences diffuses ou inconnues peuvent ne pas être prises en compte dans ce bilan.

— Les diagraphies (diamètre et sonique) montrent que la zone 180-630 m (Lescop, 1985, Feuga, 1985c) est très compacte et très saine. Par contre, les zones principales de venues d'eau se situent à 442-447 m, 825 m et 956-957 m (Feybesse et al., 1985), et des niveaux très absorbants apparaissent sur les diagraphies neutron, indiquant des zones poreuses et perméables, vers 1065 et 1125 m (Feuga, 1985c) ;

— le flux d'origine profonde (72 mWm<sup>-2</sup>) est significativement plus faible que celui auquel on s'attend dans le contexte régional (> 90 mWm<sup>-2</sup>). Ceci pourrait être lié à des effets transitoires non pris en compte dans le modèle. Le déclenchement d'une circulation du type de celle décrite plus haut est en effet associé à un régime transitoire où le gradient de température pour  $z \geq L$  est inférieur au gradient non perturbé. Ce régime transitoire est caractérisé par une constante de temps  $t$  donnée par  $L^2/k$  (où  $L$  est l'épaisseur caractéristique de la zone affectée et  $k$  est la diffusivité thermique du matériau ( $\sim 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s)), soit environ 30.000 ans. Des calculs numériques montrent qu'au bout d'un temps  $L^2/k$ , le gradient au-dessous de  $z=L$  est uniformément diminué de 10 % environ pour  $\alpha = 0.5$ , de 20 % pour  $\alpha = 1$  et 40 % pour  $\alpha = 2$ . Ainsi le flux mesuré au-dessous de 1.000 m (72 mWm<sup>-2</sup> en moyenne) serait inférieur de 10 à 30 % au flux convectif réel ; ceci permet de réconcilier cette observation avec celle du flux régional. Alternativement, rien n'exclut non plus que des circulations plus profondes que 1.400 m ne diminuent le gradient dans la partie accessible du forage.

L'importante perturbation du profil du flux intéressant la zone 600-1.000 m peut s'expliquer par une circulation d'eau relativement chaude le long d'une ou plusieurs zones de fractures sub-horizontales situées vers 800 m de profondeur. Le fait que la perturbation thermique intéresse une tranche de profondeur limitée serait caractéristique d'un phénomène transitoire dans les épontes, dont on peut alors évaluer la durée  $t$  d'après la demi-épaisseur  $z$  de la masse affectée. Celle-ci est donnée par  $t \approx z^2 / 4k$ . Pour  $z = 200$  m on obtient 400 ans, traduisant l'existence d'un phénomène très ponctuel à l'échelle des temps géologiques. Cette interprétation doit être considérée avec précaution : en effet, l'anomalie observée sur le flux entre 600 et 1.000 m est surtout due à la variation de conductivité thermique. Cette interprétation en terme de flux est justifiée dans le cas où la structure géométrique des terrains est assez tabulaire mais peut être erronée si de forts contrastes latéraux de conductivité existent.

Les anomalies de courte longueur d'onde observées sur le gradient vers 450 m, 710 m, 825 m et 950 m, peuvent recevoir une interprétation en termes de circulation le long des zones de fractures mises en évidence par ailleurs. Le même modèle présenté auparavant peut leur être appliqué : considérant que la demi-épaisseur de la zone affectée est de 5-10 m, le phénomène thermique observé est transitoire et caractérisé par une durée de 3 mois à 1 an. On peut remarquer que la durée du forage et les périodes de repos qui ont suivi les travaux tombent précisément dans cet intervalle. Il est clair que les perturbations de courte longueur d'onde sont associées à des circulations très récentes et engendrées par la réalisation du forage. Ces perturbations fournissent des informations sur l'existence de zones perméables, mais les

circulations ainsi mises en évidence n'ont pas de relation directe avec les circulations « naturelles » qui affectaient le milieu.

## 9. – Conclusion

Les mesures de température, de conductivité thermique et de production de chaleur pratiquées dans le forage de Chassole ont permis de caractériser le régime thermique de ce forage. Le point le plus net est la mise en évidence d'effets thermiques liés à des circulations à plusieurs échelles d'espace et de temps. Plusieurs anomalies très localisées (5-10 m) sont dues à des circulations très récentes induites par le forage. Par contre, les anomalies à plus grande échelle sont dues à des circulations naturelles, maintenues depuis plus longtemps. Le profil du flux géothermique présente une oscillation vers 800 m de profondeur, qu'il est possible d'interpréter comme l'effet d'une circulation le long d'une zone fracturée subhorizontale, circulation maintenue depuis un temps qui se chiffre en siècles. La décroissance générale du flux (et du gradient) depuis le haut vers le bas du forage est interprétée comme liée à une circulation ascendante dans la masse rocheuse avec une vitesse de filtration relativement élevée (1 cm/an). Le fait que le flux dans la partie profonde du forage soit anormalement faible (72 mWm<sup>-2</sup> au lieu de 90 attendus) paraît associé à un effet transitoire, dès lors que l'on suppose que la circulation est maintenue depuis quelques dizaines de milliers d'années. Il est tentant de relier les deux circulations invoquées et on pourrait imaginer une circulation subhorizontale localisée vers 800 m de profondeur, qui alimente une circulation beaucoup plus diffuse et nettement ascendante dans la partie supérieure du massif. Toutefois, les constantes de temps invoquées (400 ans et 30 000 ans) sont nettement différentes.

Cette tentative d'interprétation est bien sûr très hypothétique et il existe d'autres modèles permettant d'expliquer les mesures obtenues. L'aspect discontinu des circulations supposées pourrait être en rapport avec les modifications tectoniques affectant la masse rocheuse. Il est dès lors tentant de rapprocher la constante de temps de 400 ans des événements sismiques historiques ayant affecté la région depuis le XV<sup>e</sup> siècle (Godefroy et Lambert, 1985).

## Références bibliographiques

- BERTHIER F., TREUIL M. (1984). – Géothermalisme actuel (Cézallier). Note de synthèse. Programme Géologie Profonde de la France. Document BRGM 81-10, VII-XXIV.
- BIRCH F. (1984). – The present state of geothermal investigation. *Geophysics*, 19, pp. 645-659.
- DRURY M.L. (1984). – Borehole temperature logging for the detection of water flow. *Geoexploration*, 22, pp. 231-243.
- FEUGA B. (1985a). – Le chantier du forage de Chassole (Cézallier, Puy-de-Dôme) et son suivi scientifique. Programme Géologie Profonde de la France. Document BRGM n° 105, 3-31.
- FEUGA B. (1985 b). – Présentation des diagraphies réalisées par la société HYDROLOG dans le sondage S 2. Programme Géologie Profonde de la France. Document BRGM n° 105, pp. 217-223.
- FEUGA B. (1985 c). – Présentation des diagraphies sonique et acoustique réalisées par la société SEMM dans le sondage S 2. Programme Géologie Profonde de la France. Document BRGM N° 105, pp. 225-238.
- FEYBESSE J.L., BELIN J.M., LOISEAU P., MICHAELY B., MARTIN P., (1985). – Présentation de l'ensemble des données pétrographiques et structurales acquises sur les forages S 1 et S 2 de Chassole (Cézallier, Massif central français). Programme Géologie Profonde de la France. Document BRGM n° 105, pp. 69-132.
- GABLE R., FOUCHER J.C. (1985). – Diagraphies thermiques dans les puits de Chassole. Programme Géologie Profonde de la France. Document BRGM n° 105, pp. 263-277.
- GODEFROY P., LAMBERT J. (1985). – Sismicité du Cézallier et des régions limitrophes. Doc. BRGM n° 95-10, pp. 175-282.
- GOVINDAJARA K., MELVELLE C., CHOUARD C. (1976). – Automated optical emission, spectrochemical bulk analysis of silicated rocks with microwave plasma excitation. *Anal. Chem.*, 48, pp. 1325-1331.
- JOLIVET J. (1985). – Mesures de températures effectuées dans les forages S1 et S2 de Chassole. Programme Géologie Profonde de la France. Document BRGM n° 105, pp. 239-262.
- LESCOP J.P. (1985). – Diagraphies des forages Chassole S 1 et S 2. Programme Géologie Profonde de la France. Document BRGM n° 105, pp. 185-215.
- LUCAZEAU F., BAYER R. (1982). – Évolution géothermique du Massif central français depuis l'Oligocène. *Ann. Geophys.*, 38, pp. 405-429.
- LUCAZEAU F., VASSEUR G. (1987). – Heat flow density and geothermal maps in France. International Meeting Terrestrial heat flow and the lithosphere structure. Bechyne-Tchecoslovaquie.
- VASSEUR G. (1982). – Synthèse des résultats de flux géothermique en France. *Ann. Géophys.*, 38, pp. 189-201.
- VIDAL O., VASSEUR G., LUCAZEAU F. (1984). – Mesures géothermiques dans la région du Cézallier. Programme Géologie Profonde de la France. Document BRGM n° 81-10, pp. 153-162.

- ANNEXE I -  
MESURES DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE

Profondeur	Angle de la foliation avec un plan horizontal	Conductivité thermique W°C/m	Remarques
<u>Orthogneiss fin normal</u>			
279.70	35°	2.79 (.02)	gris
360.0	12°	2.38 (.03)	gris
420.0	10°	2.15 (.04)	gris foncé
479.75	10°	2.54 (.02)	gris
497.80	10°	2.26 (.03)	gris
580.0	12°	2.44 (.04)	gris
838.80	5°	2.51 (.03)	gris foncé
979.70	15°	2.21 (.03)	gris foncé. filons de granite
1059.60	15°	2.35 (.03)	gris foncé
1120.0	0°	3.02 (.02)	gris foncé
1139.90	30°	2.26 (.02)	gris foncé. inclusions blanches
1220.0	10°	2.36 (.03)	gris foncé
1259.30	25°	2.26 (.03)	gris foncé
1319.90	10°/30°	2.83 (.03)	gris foncé
1339.90	20°/45°	2.14 (.02)	gris foncé. filonets et fractures
1360.0	3°	2.39 (.02)	gris
1380.0	0°	2.55 (.03)	gris
1398.90	15°/45°	2.42 (.02)	gris
<u>Orthogneiss fin hydrothermalisé</u>			
219.60	17°	2.52 (.01)	gris
		2.68 (.02)	gris blanc
300.00	30°	3.11 (.04)	excès de biotite
320.30	20°	2.83 (.01)	gris
339.90	40°	2.93 (.01)	gris
380.0	45°	3.12 (.04)	gris
440.0	5°	2.50 (.03)	gris
459.30	5°	2.26 (.02)	hydrothermalisée 100%
459.40	5°	2.16 (.01)	partiellement hydrothermalisée
519.0		2.83 (.02)	gris blanc
540.0	5°	2.49 (.02)	gris blanc
860.0	2°	2.48 (.03)	gris foncé
1160.0	5°	3.22 (.03)	passage au grossier
1300.0	1°	2.53 (.03)	veinule hydrothermalisée
<u>Orthogneiss grossier</u>			
599.90	20°	2.62 (.04)	gris hydrothermalisé à 20%
619.50	30°	2.94 (.03)	gris blanc. veinules de sidérite
639.90	20°	2.53 (.03)	typique - gris blanc
660	0°	2.52 (.03)	gris blanc
739.90	10°	2.46 (.04)	phéocristaux
819.70	0°	2.39 (.03)	typique - gris blanc
880.30	0°	2.31 (.03)	gris blanc
900	5°	2.23 (.02)	gris
920.0	10°	2.02 (.10)	veines hydrothermalisées
940.0	7°	2.01 (.03)	nettement altéré
960.4	5°	2.13 (.01)	typique - gris blanc
1000.0	10°	2.15 (.04)	gris
1020.0	15°	2.12 (.03)	gris
1038.6	2°	2.22 (.03)	gris
1080.2	15°	2.30 (.04)	gris
1100	20°	2.28 (.02)	gris
1180.0	10°	2.75 (.02)	un peu altéré
<u>Orthogneiss moyen</u>			
240.10	10°	2.49 (.01)	gris - défaut de biotite
400.0	40°	2.76 (.03)	gris
1200.0	30°	2.29 (.02)	gris
1240.0	0°	2.29 (.03)	gris
1280.0	5°	2.36 (.03)	gris
<u>Leucogranite</u>			
680.0	15°	3.23 (.03)	grain fin
720.0	20°	3.23 (.03)	typique
762.0	10°	3.19 (.04)	typique
800.0	65°	3.17 (.04)	typique
<u>Meta-aplite</u>			
259.80	25°	2.74 (.03)	blanc
560.0	6°	2.99 (.03)	blanc
780.9	10°	3.12 (.03)	blanc

- ANNEXE II -

MESURES DE LA PRODUCTION DE CHALEUR

Profondeur	U ppm	Th ppm	K %	Th/U	$\Delta \mu \text{Wm}^{-3}$
<u>Orthogneiss fin normal</u>					
279.70	3.01	10.27	3.7	3.4	1.8
479.75	3.54	10.41	(2.8)	2.9	1.95
580.00	3.43	13.63	(2.8) +	4.0	2.15
838.90	3.57	14.26	(2.8)	4.0	2.23
1380.00	2.26	13.52	(2.8)	6.0	1.83
<u>Orthogneiss fin hydrothermalisé</u>					
380	2.67	9.88	2.26	3.7	1.63
519.10	3.72	11.35	(2.8)	3.1	2.06
<u>Orthogneiss grossier</u>					
619.50	3.79	8.59	3.42	2.3	1.94
880.30	2.14	10.97	(2.8)	5.1	1.62
1000.00	2.96	13.03	(2.8)	4.4	1.98
1080.20	2.12	13.18	(2.8)	6.2	1.77
1180.00	7.72	11.90	(2.8)	1.5	3.14
<u>Orthogneiss moyen</u>					
240.10	2.58	7.39	(2.8)	2.9	1.48
400.20	3.74	12.70	(2.8)	3.4	2.16
1280.0	4.74	13.98	(2.8)	2.9	2.51
<u>Leucogranite</u>					
679.76	4.61	0.79	3.27	0.2	1.58
<u>Meta-aplite</u>					
259.80	9.64	25.12	4.68	2.6	4.57
780.90	4.6	17.45	2.47	3.8	2.70

+ (2.8.) correspond à une valeur non mesurée mais extrapolée à partir des analyses sur les orthogneiss de la région.

- ANNEXE III -  
 DETERMINATION DU FLUX DE CHALEUR

Profondeur m	Gradient brut °C/km	Conductivité W/°C/m	Flux brut mW/m <sup>2</sup>	Correction paléo sur le gradient	Gradient corrige °C/km	Correction prod. chaleur mW/m <sup>2</sup>	Flux corrige mW/m <sup>2</sup>
190-210	41.58	2.50	104	3.30	44.88	0.4	113
210-230	38.89	2.60	101	3.29	42.18	0.44	110
230-250	37.83	2.49	94	3.29	41.12	0.48	103
250-270	37.83	2.74	104	3.30	41.13	0.52	113
270-290	38.27	2.28	87	3.90	42.17	0.56	97
290-310	37.94	3.11	118	3.29	41.23	0.60	129
310-330	37.00	2.83	105	3.38	40.38	0.64	115
330-350	35.92	2.93	105	3.38	39.30	0.68	116
350-370	35.64	2.38	85	3.26	38.90	0.72	93
370-390	36.25	3.12	113	3.22	39.47	0.76	124
390-410	36.28	2.75	100	3.18	39.46	0.80	109
410-430	37.73	2.15	81	3.14	40.87	0.84	89
430-450	38.53	2.50	96	3.08	41.61	0.88	105
450-470	35.52	2.21	78	3.02	38.54	0.92	86
470-490	35.04	2.54	89	2.95	37.99	0.96	97
490-510	35.91	2.26	81	2.88	38.79	1.00	89
510-530	34.25	2.83	97	2.81	37.06	1.04	106
530-550	32.76	2.49	82	2.74	35.50	1.08	89
550-570	31.99	2.99	96	2.66	34.65	1.12	105
570-590	31.17	2.44	76	2.58	33.75	1.16	84
590-610	30.79	2.62	81	2.5	33.29	1.20	88
610-630	31.37	2.94	92	2.42	33.79	1.24	101
630-650	31.68	2.53	80	2.34	34.02	1.28	87
650-670	31.04	2.52	78	2.26	33.30	1.32	85
670-690	28.22	3.23	91	2.18	30.40	1.36	100
690-710	28.01	3.23	90	2.10	30.11	1.40	99
710-730	33.44	3.23	108	2.02	35.46	1.44	116
730-750	35.32	2.46	87	1.94	37.26	1.48	93
750-770	32.62	3.19	104	1.86	34.48	1.52	118
770-790	30.22	3.12	94	1.78	32.00	1.56	101
790-810	29.11	3.17	92	1.70	30.81	1.60	99
810-830	31.09	2.39	74	1.62	32.71	1.64	80
830-850	32.84	2.51	82	1.54	34.38	1.68	88
850-870	31.33	2.48	78	1.46	32.79	1.72	83
870-890	30.12	2.31	70	1.38	31.50	1.76	75

890-910	30.21	2.23	67	1.28	31.50	1.80	72
910-930	28.15	2.02	57	1.21	29.36	1.84	61
930-950	29.26	2.01	59	1.13	30.39	1.88	63
950-970	36.02	2.13	77	1.05	37.07	1.92	81
970-990	37.51	2.21	83	0.97	38.48	1.96	87
990-1010	34.56	2.15	74	0.88	35.44	2.00	78
1010-1030	32.92	2.12	70	0.80	33.72	2.04	74
1030-1050	32.14	2.22	71	0.72	32.86	2.08	75
1050-1070	31.43	2.35	74	0.64	32.07	2.12	78
1070-1090	30.91	2.30	71	0.56	31.47	2.16	75
1090-1110	30.27	2.28	69	0.48	30.75	2.20	72
1110-1130	29.45	3.02	89	0.40	29.85	2.24	92
1130-1150	28.87	2.26	65	0.32	29.19	2.28	68
1150-1170	28.76	3.04	87	0.24	29.00	2.32	90
1170-1190	28.89	2.75	79	0.17	29.06	2.36	82
1190-1210	28.52	2.29	65	0.09	28.61	2.40	68
1210-1230	27.98	2.36	66	0.02	28.00	2.44	69
1230-1250	28.31	2.29	65	- 0.05	28.26	2.48	67
1250-1270	29.10	2.26	66	- 0.09	29.01	2.52	68
1270-1290	29.35	2.36	69	- 0.19	29.16	2.56	71
1290-1310	29.33	2.53	74	- 0.26	29.07	2.60	76
1310-1330	29.34	2.83	83	- 0.33	29.01	2.64	85
1330-1350	29.08	2.14	62	- 0.39	28.69	2.68	64
1350-1370	27.10	2.39	65	- 0.46	26.64	2.72	66
1370-1390	25.33	2.65	67	- 0.51	24.82	2.76	69
1390-1410		2.42					