

Mise en évidence d'un phénomène de réfraction thermique entre le granite de Beauvoir et son encaissant : mesures et modélisation

J.J. Royer*, M. Danis**

Mots-clés : Conductivité thermique, Granite (Granite Beauvoir), Micaschiste, Flux géothermique (Réfraction thermique)
Modèle 2 dimensions, Transfert chaleur.

Allier (Cézallier)

Résumé

Les mesures de conductivité thermique, sur 25 carottes de sondage réparties entre 80 et 900 mètres, ont été réalisées systématiquement sur les principaux faciès du forage d'Echassières (sondage GPF, Massif Central Français). La conductivité thermique augmente de 2.8 à $3.5 \text{ W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$ en fonction de la profondeur dans le faciès B1 entre 180 et 480 m, tandis qu'elle fluctue autour d'une valeur moyenne d'environ $3.4 \text{ W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$ dans les faciès B2 et B3. Ces variations sont attribuées à la charge en quartz (augmentation de la teneur en quartz avec la profondeur pour B1 et teneur à peu près constante pour B2 et B3). La foliation du granite de Beauvoir évaluée à 40° d'après l'orientation préférentielle des micas, observée par Gagny et Jacquot (1986) et Bernier *et al.* (1987), ne se traduit pas par une anisotropie marquée sur les conductivités thermiques. Des mesures au goniomètre de texture effectuées sur un échantillon confirment l'orientation aléatoire des cristaux de quartz. Par contre, une forte anisotropie de la conductivité thermique est observée dans les schistes de l'encaissant, avec des conductivités principales verticale et horizontale égales respectivement à $2.2 \text{ W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$ et $3.2 \text{ W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$ pour la série des micaschistes de la Sioule.

Le flux géothermique vertical calculé à partir des données de forage est de l'ordre de 150 mW m^{-2} , atteignant 160 mW m^{-2} et plus vers 800 m de profondeur. Ces valeurs élevées sont incompatibles avec les mesures effectuées sur le Massif central, et sont attribuées à un phénomène de réfraction thermique (fort contraste de conductivités entre différents faciès).

Après compilation des différents travaux de reconnaissance effectués sur le site d'Echassières, la géométrie du granite de Beauvoir a pu être précisée dans une coupe verticale bidimensionnelle. Ces données ont ensuite été utilisées afin de simuler les transferts de chaleur autour du forage d'Echassières. Plusieurs hypothèses ont été testées. Le modèle retenu permet de retrouver les températures mesurées dans le forage avec une erreur quadratique moyenne inférieure à 0.15°C et des écarts locaux inférieurs à 0.7°C . Ce modèle implique un flux géothermique régional moyen de 135 mW m^{-2} ; cette valeur est élevée mais compatible avec certaines mesures publiées par Vasseur (1982) sur le Massif central. Du point de vue méthodologique, ces résultats montrent que le calcul direct du flux de chaleur, sans tenir compte des transferts de chaleur mis en jeu autour du site de mesure, conduit parfois à des résultats erronés, comme cela avait été déjà montré par les auteurs sur un autre site (Danis, Royer, 1986).

Abstract

Evidence of heat refraction in and around Beauvoir granite : measurements and modelling.

The thermal conductivity has been measured on 25 different samples of rock ranging from a depth of 80 to 900 m in the Echassières borehole (Deep Drilling Project GPF, Massif Central, France). The thermal conductivity of the B1 granite rocks increases from $2.8 \text{ W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$ at 180 m in depth to $3.5 \text{ W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$ at 480 m, whilst it is nearly constant in the B2 and B3 granite types at $3.4 \text{ W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$. These variations are related to the quartz content of the rocks (increase of the quartz content with depth for the B1 type, and constant quartz proportion for the B2 and B3 types). A foliation of the Beauvoir granite with a dip of 40° has been reported from the orientation of micas by Gagny, Jacquot (1986) and by Bernier (1987). This foliation produces no major anisotropy in the thermal conductivity. Additional measurements of quartz orientations have been made using a tex-

* L.I.A.D., E.N.S.G., B.P. 40, rue du Doyen Marcel Roubault, 54501 Vandoeuvre-Les-Nancy

** C.R.P.G., B.P. 20, 15 rue Notre-Dame des Pauvres, 54501 Vandoeuvre-Les-Nancy

ture goniometer, showing random quartz crystal orientations. The micaschists of the Sioule series situated at the roof of the Beauvoir granite have a thermal conductivity anisotropy, such that the vertical and horizontal principal conductivities are 2.2 and $3.2 \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ respectively.

The unusually high mean vertical heat flow of 150 mW m^{-2} (increasing to 160 mW m^{-2} at the bottom) calculated using measured temperatures in the borehole is incompatible with the regional mean values reported in the Massif Central, and gives evidence of heat refraction around the borehole resulting from the great thermal conductivity variations from one rock type to another.

The shape of the Beauvoir granite has been reconstructed in a 2D vertical section from the preliminary field data. The heat transfer around the Echassières borehole has been determined by numerical simulation and several hypotheses have been tested. The most relevant model involves a mean regional heat flow of 135 mW m^{-2} , a compatible value with some preceding measurements reported by Vasseur (1982).

From the methodological point of view, this study shows that the interpretation of heat flow measurements made at a regional scale may be significantly affected by heat refraction around high conductivity plutons. A careful interpretation of measured temperatures and heat transfer is necessary in order to obtain reliable regional heat flow densities, as shown by Danis et Royer (1986) in a sedimentary context.

1. – Introduction

Les mesures de températures sur le forage d'Echassières ont été réalisées par le BRGM en 1985 (Gable, Foucher). Ces études préliminaires montrent que le gradient de température augmente légèrement en profondeur. Si l'on admet l'hypothèse classique d'un flux géothermique vertical constant, ces mesures impliqueraient une diminution des conductivités thermiques en profondeur. Afin d'étayer cette hypothèse de travail et avant toute évaluation du flux géothermique régional, il était indispensable de connaître les conductivités thermiques sur quelques échantillons de carottes prélevées à des profondeurs significatives par rapport à la lithologie et aux gradients géothermiques mesurés.

Une trentaine de mesures de conductivités thermiques ont été effectuées au CRPG sur 25 carottes, et nous discutons les résultats en fonction de la lithologie. Une relation liant la composition chimique des granites et leur conductivité thermique est alors vérifiée, en accord avec les travaux expérimentaux de Koutsikos (1985). Après compilation des différents travaux de reconnaissance (géophysique, géochimie, géologie structurale), ces valeurs de conductivité sont utilisées pour la construction d'un modèle bidimensionnel des transferts thermiques autour du forage d'Echassières. Les températures calculées grâce au modèle sont comparées à celles mesurées le long du forage : les résultats apparaissent cohérents et sont alors utilisés pour quantifier le flux géothermique régional.

2. – Conductivités thermiques et flux géothermique dans le forage

2.1. – Conductivités thermiques

Les mesures de conductivité thermique ont été réalisées à l'aide d'un conductivimètre symétrique (Royer, Danis, 1987) sur les différents faciès lithologiques du forage d'Echassières (21 mesures de conductivité thermique verticale, 6 mesures de conductivité thermique horizontale et 2 mesures sur granite parallèlement et perpendiculairement à la foliation). Ces résultats de mesures reportés sur la figure 1 appellent un certain nombre de remarques.

Conductivité Thermique

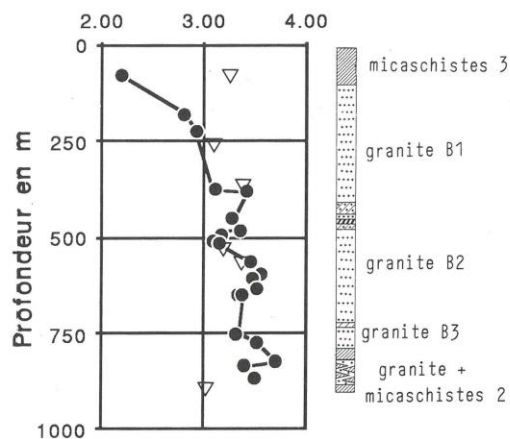


Fig. 1. – Evolution des conductivités thermiques en fonction des faciès lithologiques dans le forage d'Echassières. Les conductivités verticales sont labellées ●, et les conductivités horizontales ▽.
Thermal conductivities as a function of lithology in Echassières borehole, Allier (France). Vertical thermal conductivities are labelled ●, and horizontal ones ▽.

Granite

La conductivité thermique verticale du granite de Beauvoir faciès B1 augmente avec la profondeur de 2.8 à $3.5 \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Cette augmentation a été attribuée à un enrichissement progressif en quartz de 28 % à 32 % environ.

Les granites de Beauvoir B2 et B3 ont des conductivités peu différentes, voisines de $3.4 \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, et une teneur en quartz d'environ 32 %.

La direction de la foliation du granite de Beauvoir a été évaluée à 40° par Gagny, Jacquot (1986) et Bernier et al. (1987). Ces auteurs ont également noté l'orientation préférentielle des micas suivant le litage. Par contre, des mesures au goniomètre de texture effectuées sur un échantillon, ont montré une orientation aléatoire des cristaux de quartz. Les conductivités thermiques de l'échantillon E493 (correspondant à la profondeur 493 m) parallèlement et perpendiculairement à la foliation sont respectivement 3.34 et 3.39 W m^{-1} .

$^{\circ}\text{C}^{-1}$; ces valeurs sont très voisines de la conductivité verticale mesurée sur la même carotte ($3.17 \text{ W m}^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$). La différence [$< 7\%$] est attribuée à l'hétérogénéité de la roche et aux erreurs de mesure. Compte tenu de ces résultats, la conductivité thermique du granite de Beauvoir peut être considérée comme isotrope.

Des mesures complémentaires ont été faites sur deux échantillons distants d'environ 15 cm, E383 : les valeurs obtenues (3.39 et $3.48 \text{ W m}^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$) montrent, comme pour le E493, une bonne homogénéité à l'échelle décimétrique. A l'échelle décimétrique, on observe entre les échantillons E376 et E383 une différence relative inférieure à 10% , et un résultat voisin est obtenu entre les échantillons E825 et E836. Ceci semble démontrer une assez bonne homogénéité de la conductivité thermique du granite.

Il est possible d'évaluer la conductivité thermique des roches granitoïdes à partir de la chimie des éléments majeurs (Koutsikos, 1985). Pour cela, nous avons utilisé la norme CIPW afin d'apprécier la quantité de quartz présent dans la roche. Le granite est assimilé du point de vue thermique à un ensemble de deux phases, d'une part le quartz de conductivité thermique moyenne $7.7 \text{ W m}^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$, et d'autre part tous les autres minéraux dont la conductivité moyenne est estimée à $1.85 \text{ W m}^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$. Une formule empirique simple (5) permet alors de déterminer la conductivité thermique en fonction de la teneur en quartz :

$$\lambda = 7.7^{(0.93 \text{ Qz} + 0.07)} \cdot 1.85^{(0.93 - 0.93 \text{ Qz})} \quad (5)$$

avec λ = conductivité thermique du granite ;
Qz = teneur massique en quartz.

Ces calculs ont été appliqués aux données chimiques disponibles, et nous avons constaté un bon accord entre les conductivités thermiques ainsi obtenues et celles mesurées. En général, les conductivités mesurées sont un peu supérieures à celles calculées, mais la différence ne dépasse pas 10% . Il est probable que cet écart provient des minéraux particuliers tels que topaze, phosphates, microlite, columbo-tantalite qui ne sont pas pris en compte dans le calcul de la norme CIPW.

Micaschistes

Pour les micaschistes de la couverture, à schistosité sub-horizontale, nous avons mesuré les conductivités thermiques verticale et horizontale sur 1 seule carotte ; on observe une forte anisotropie (conductivité thermique verticale : $2.2 \text{ W m}^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$; horizontale : $3.2 \text{ W m}^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$; rapport d'anisotropie : 0.69).

En fond de forage, le pendage de la schistosité est de 40° , et la conductivité thermique mesurée parallèlement à la schistosité vaut $3.0 \text{ W m}^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$, valeur à rapprocher de $3.2 \text{ W m}^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$ obtenus dans les micaschistes de la couverture.

Ces valeurs sont un peu élevées par comparaison avec celles publiées dans la littérature (1.95 et $2.65 \text{ W m}^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$ d'après Kappelmeyer et Haenel, 1974), et peuvent être attribuées à la teneur en quartz plus élevée de l'encaissant du granite (Stockwork et filons de quartz hydrothermaux).

2.2. — Conservation du flux géothermique

Il est classique d'évaluer la qualité d'une mesure de flux géothermique en vérifiant la conservation du flux tout le long du forage (Balling et al., 1981).

La diagraphie thermique du forage d'Echassières a été réalisée par Gable et Foucher (1985). Les mesures ont été faites après retour à l'équilibre thermique du sondage, à l'aide d'une sonde thermique développée par le BRGM dans le cadre des travaux sur le flux thermique en France. Les résultats reportés sur la figure 2 montrent que le gradient de température est sensiblement constant un peu inférieur à $5^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$ jusqu'à 500 m , augmente légèrement jusqu'à 800 m pour présenter des variations plus marquées dans les micaschistes situés à la base du forage. D'après les mesures de déviation consignées dans le rapport d'exécution (Degouy et Breton, 1985), le forage peut être considéré comme vertical ; il est alors possible de calculer la composante verticale du flux de chaleur en multipliant en tout point le gradient par les conductivités thermiques mesurées sur échantillons (fig. 3). On constate que le flux varie de 127 mW m^{-2} à 174 mW m^{-2} ce qui devrait entraîner le rejet de la mesure de flux (qualité de mesure inférieure à C, suivant la classification de Balling et al., 1981). Les instances internationales, en particulier la CEE (Balling et al., 1981), recommandent de corriger les valeurs de flux géothermiques des effets topographiques et paléoclimatiques. Mais dans le cas d'Echassières, la conductivité thermique est très hétérogène, voire anisotrope pour les micaschistes de couverture et de l'encaissant, il devenait donc impossible de calculer les corrections en utilisant les procédures classiquement admises. C'est la raison pour laquelle, nous avons travaillé sur les mesures de flux directes non corrigées.

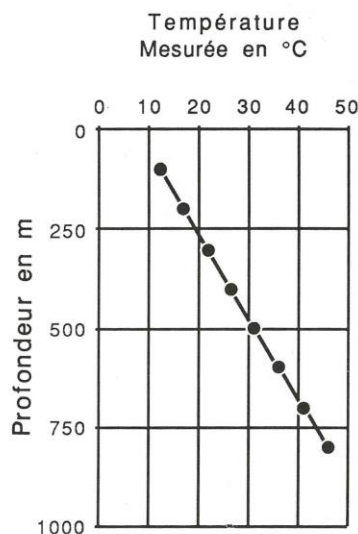


Fig. 2. — Diagraphie thermique du forage d'Echassières, tracée à maille de 100 m à partir des données de R. Gable et J.C. Foucher. (1985).
Thermal logging in Echassières borehole.

On peut penser que la non-conservation de la composante verticale du flux de chaleur est due à un effet géométrique, phénomène de réfraction thermique observé aussi bien en milieu sédimentaire (Gable 1984) qu'en milieu cristallin (England et al., 1980) : le granite de Beauvoir intrusif dans un encaissant de micaschistes peu conducteurs produirait une déformation des isothermes, il serait alors un chemin préfé-

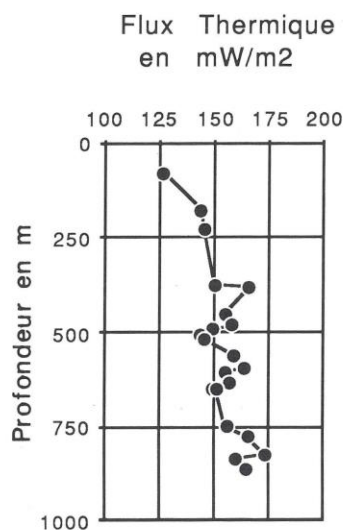


Fig. 3. — Flux géothermique en fonction de la profondeur, calculé à partir de la diagraphe thermique et des valeurs de conductivité thermique.
Vertical heat flow as a function of depth in the Echassières borehole.

rentiel pour la chaleur entre le granite sous-jacent de la Bosse et la surface, tandis que les micaschistes joueraient le rôle d'isolant thermique. Afin de préciser quantitativement ce schéma, une modélisation thermique bidimensionnelle a été faite.

3. — Modélisation 2D

3.1. — Construction du modèle et conditions aux limites

Définition de la géométrie

Le modèle numérique a été construit suivant une section verticale de 2 000 m centrée sur le forage, d'extension 3 000 m et d'orientation SSW-NNE choisie perpendiculairement à l'axe supposé du plus grand allongement de la lame intrusive de Beauvoir (fig. 4). Les travaux de géophysique et de géochimie effectués lors de la première phase de reconnaissance du site, ont été utilisés pour dimensionner les différentes unités lithologiques connues.

Le granite sous-jacent de la Bosse (Aubert, 1969 ; Cuney et al., 1986) a été placé à 1 600 m de profondeur. L'incertitude des mesures et la présence de la lame de Beauvoir ne permet pas de préciser la forme du toit de ce granite hypothétique que l'on a supposé sub-horizontale.

Le granite albitique à topaze-lépidolite de Beauvoir constitue un corps intrusif autonome d'au moins 500 m d'épaisseur, dans la série des micaschistes de la Sioule. Trois unités pétrographiques superposées, de compositions proches mais de propriétés thermiques distinctes ont été caracté-

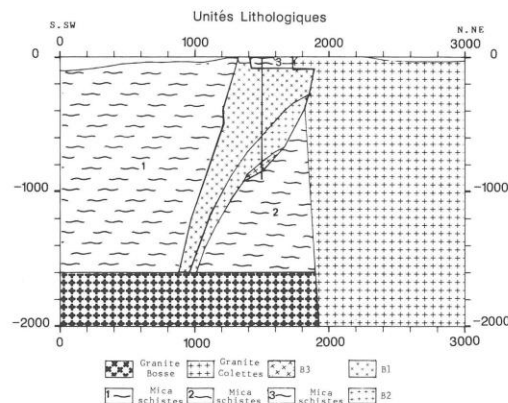


Fig. 4. — Coupe verticale et géométrie des principales unités lithologiques utilisées pour la modélisation numérique.
Vertical elevation and shapes of the main lithological units used in the 2D model of thermal transfer around the Beauvoir granite.

risées minéralogiquement et par géochimie. Il est difficile de préciser la forme géométrique exacte du granite de Beauvoir. Cependant, les études de « pétrofabrique » sur lames minces (Gagny et Jacquot, 1986) et les récents travaux sur la fabrique magnétique (Bernier et al., 1987) indiquent une foliation planaire moyenne, pentée à 40° vers le SSW. Des essais numériques préliminaires nous ont montré que si l'on conserve un pendage moyen de 40° sur l'ensemble de la lame de Beauvoir, il n'est plus possible d'expliquer l'augmentation du gradient thermique à la base du forage. Afin de satisfaire ces contraintes thermiques et géométriques, nous avons supposé que le contact SSW entre les micaschistes de la Sioule et la lame de Beauvoir se redressait, ce qui implique un amincissement de la lame granitique en profondeur. Par ailleurs, les anomalies à étain tungstène observées dans le granite des Colettes à proximité du contact NNE (Burnol et Viallefond, 1984), suggèrent que le granite de Beauvoir serait recouvert en partie par le granite des Colettes. L'ensemble granitique de Beauvoir est limité au NNE par le granite des Colettes suivant un contact sub-vertical. Ce modèle est tout à fait comparable à la coupe géologique verticale publiée par Cuney et al. (1985 et 1986).

La série des micaschistes de la Sioule, à schistosité sub-horizontale, recouvre de manière homogène le granite de la Bosse. On suppose que cette série se prolonge sous le granite de Beauvoir ; la schistosité à 40°, observée au fond du forage à proximité immédiate du granite de Beauvoir, est vraisemblablement d'origine tectonique, c'est la raison pour laquelle nous avons supposé qu'en profondeur la schistosité était horizontale.

Enfin, dans le modèle adopté, nous avons simplifié la surface topographique, en l'assimilant à un plan passant par la tête du forage d'Echassières.

Conditions aux limites

Deux types de conditions aux limites ont été fixées dans le modèle : (i) une condition de température constante en surface fixée à 6.4 °C, (ii) des conditions de flux de chaleur nul sur les limites latérales du domaine, constant et égal à 135 mW m⁻² à 2 000 m de profondeur.

La température en surface est compatible avec la température moyenne régionale du sol évaluée à 6.4 °C (Garnier, 1982). Cette température annuelle moyenne est légèrement inférieure à la température de 7.7 °C extrapolée à partir de la diagraphie thermique (fig. 2), mais il est probable que les effets topographiques et l'hétérogénéité des schistes de couverture (stockwork à ferberite) perturbent sensiblement le gradient géothermique à proximité du sol, ce qui justifie la valeur de 6.4 °C retenue.

Le flux de 135 mW m⁻² a été ajusté par essais numériques successifs. Cette valeur est relativement élevée mais compatible avec les données publiées sur le Massif central (Vasseur, 1982). Si l'on fait l'hypothèse que Beauvoir représente le stade ultime de la différenciation du granite de la Bosse, cela implique que le granite de la Bosse serait de type alumineux et aurait une production de chaleur d'environ 4 à 5 μW.m⁻³, une épaisseur de granite de 3 000 à 4 000 m compatible avec les données gravimétriques (Vigneress et al., 1984, 1985) et électriques (Favin et Millon, 1984), suffirait à expliquer la valeur élevée du flux thermique à la base.

Le fait que les limites latérales du domaine étudié se situent dans des faciès relativement homogènes, au SSW dans les micaschistes de la Sioule et au NNE dans le granite des Colettes, permet de penser que l'on peut imposer des conditions de flux nul sur ces limites. Ce choix sera justifié ultérieurement dans le paragraphe § 3.3.

Production de chaleur

La teneur moyenne en éléments radiogéniques, principalement U, Th et K₂O, a été déterminée par activation neutronique sur environ 70 échantillons répartis de manière homogène le long du profil (Raimbault et Azencott, communication écrite). On remarque un enrichissement progressif en U et K₂O en fonction de la profondeur et un appauvrissement en Th. Ainsi, contrairement à ce qui est observé classiquement, l'U diminue avec la différenciation magmatique. La production de chaleur calculée suivant la formule de Birch et al. (1968), augmente linéairement en fonction de la profondeur jusqu'à 500 m (faciès B1), puis varie autour d'une valeur presque constante de 4.5 μW m⁻³ au-delà ; dans le détail, on notera toutefois une légère diminution de la production de chaleur en fonction de la profondeur sur les faciès B2 et B3 (fig. 5). Un modèle linéaire a été ajusté sur ces deux faciès :

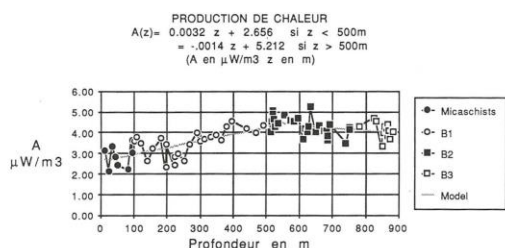


Fig. 5. — Variation de la production de chaleur en fonction des principales unités lithologiques : un modèle linéaire est ajusté sur l'ensemble des valeurs. Heat production as a function of lithology : the values follow a linear model.

$A = 0.0032z + 2.656$ pour $z < 500$ m et $A = -0.0014z + 5.212$ pour $z > 500$ m, où A est la production de chaleur volumique en μW m⁻³ et z la profondeur en m. A la suite des travaux de Lachenbruch (1968), Sclater et al. (1980) et England et al.

(1980) il était admis que la production de chaleur décroît en fonction de la profondeur suivant une loi exponentielle : ce modèle permet d'expliquer la relation linéaire observée à grande échelle entre le flux de chaleur et la production de chaleur en surface. On remarque que, du fait du comportement particulier de l'U, la production de chaleur du granite de Beauvoir ne décroît pas en fonction de la profondeur, du moins sur 800 m, et s'écarte donc de ce modèle. Les productions de chaleur moyennes des faciès B1, B2 et B3 sont respectivement de 3.53, 4.30 et 4.11 μW m⁻³. Ces valeurs sont normales compte tenu des faciès granitiques observés : la production de chaleur moyenne des granites alumineux du Massif central varie entre 3 et 5 μW m⁻³. La production de chaleur moyenne des granites alumineux du Massif central varie entre 3 et 5 μW m⁻³. La production de chaleur moyenne dans les micaschistes est de l'ordre de 2.85 μW m⁻³.

La production de chaleur peut être négligée dans la modélisation thermique dans la mesure où sa contribution au flux de surface ne peut pas être supérieure à quelques mW m⁻².

Choix des conductivités thermiques

Les conductivités thermiques des différentes unités lithologiques introduites dans le modèle sont consignées dans le tableau 1.

	$\lambda_{\text{verticale}}$	$\lambda_{\text{horizontale}}$
Granite de la Bosse	3.2	3.2
Granite des Colettes	3.2	3.2
Beauvoir Type B1	2.8 ~ 3.5	2.8 ~ 3.5
Beauvoir Type B2	3.4	3.4
Beauvoir Type B3	2.4	3.1
Micaschistes 1	2.0	3.0
Micaschistes 2	2.0	3.0
Micaschistes 3	2.2	3.2

Tabl. 1 - Conductivités thermiques utilisées pour la simulation numérique dans le modèle 2D de transferts thermiques autour du forage d'Echassières.

Thermal conductivity values used in the 2D model of heat transfer around Echassières borehole.

On a choisi une valeur moyenne de 3.2 W m⁻¹ °C⁻¹ pour le granite des Colettes et pour le granite de la Bosse. Cette valeur de référence est couramment admise pour ce type de granite (Kappelmeyer et Haenel, 1974).

On a vu précédemment que la conductivité thermique des schistes du faciès 3 (fig. 4) déterminée sur un échantillon de surface était anisotrope avec une conductivité verticale de 2.2 W m⁻¹ °C⁻¹ et une conductivité horizontale de 3.2 W m⁻¹ °C⁻¹. On a choisi des valeurs de conductivités thermiques verticale et horizontale de 2.0 et 3.0 W m⁻¹ °C⁻¹ pour les micaschistes des faciès 1 et 2, correspondant à la mesure effectuée sur l'échantillon en fond de forage. L'hypothèse que les micaschistes des faciès 1 et 2 ont un même comportement thermique est justifiée par le modèle de mise en place proposé actuellement : en effet, il est vraisemblable que le granite de Beauvoir se soit mis en place à la faveur de mouvements tectoniques par « écartement » et « translation » des micaschistes de couverture (Cuney et al., 1986).

A partir des mesures disponibles sur le granite de Beauvoir, nous avons pris une conductivité thermique moyenne isotrope de 3.4 W m⁻¹ °C⁻¹ pour les faciès B2 et B3, et nous

avons ajusté un modèle de conductivité thermique à décroissance linéaire sur l'ensemble du faciès B1 d'équation :

$$\lambda(x,y) = \text{Minimum} [3.5, 3.78 - .0016 (y - 1.5x + 3\,025)] \quad (6)$$

où x et y sont les coordonnées exprimées en m.

Ce modèle ajuste relativement bien les conductivités thermiques disponibles sur le forage (erreur quadratique moyenne inférieure à $0.1 \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) et est compatible avec l'augmentation du quartz en fonction de la profondeur.

3.2. — Simulation numérique des transferts thermiques

L'équation de la chaleur en conduction pure et en régime permanent, a été résolue par la méthode des éléments finis sur une grille de 31×21 noeuds (mailles de $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$) (Mallet, 1971), avec les conditions aux limites décrites ci-dessus. Plusieurs essais numériques ont été tentés avec différentes hypothèses de travail (flux à la base, température de surface, ...) nous ne présenterons pas ici l'ensemble des résultats obtenus, mais simplement les conclusions auxquelles nous avons abouti. Le champ des températures ainsi que la carte de la composante verticale du flux, représentés sur les figures 6 et 8 ont été tracés à l'aide du logiciel GEOL (Jacquemin et al., 1985).

3.3. — Discussion

Le champ des températures, représenté sur la figure 6 suivant une coupe verticale, est évidemment dissymétrique du fait des contrastes de conductivités thermiques du modèle. Ainsi, une différence de température de l'ordre de 10°C (pour une température moyenne de 110°C environ) est observée à $2\,000 \text{ m}$ de profondeur entre le granite de la Bosse et celui des Colettes. Les températures mesurées dans le forage sont bien ajustées par ce modèle, puisque l'erreur maximale entre la température calculée et la température mesurée est inférieure à 0.7°C (fig. 7). L'erreur quadratique moyenne calculée sur l'ensemble du forage est inférieure à 0.15°C .

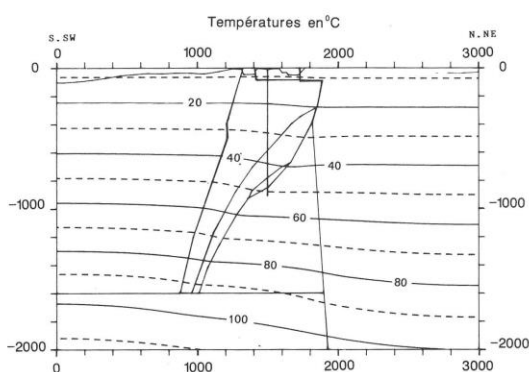


Fig. 6. — Champ des températures calculées par modélisation numérique 2D.
Temperature field calculated by the 2D vertical numerical model for the Echassières borehole.

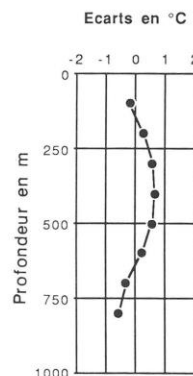


Fig. 7. — Ecart entre les températures calculées par modélisation numérique et celles mesurées dans le forage d'Echassières.
Differences between measured and calculated temperatures in Echassières borehole.

La figure 8 met en évidence une dissymétrie du flux thermique vertical. Au NNE, le flux atteint une valeur moyenne de 150 mW m^{-2} dans le granite des Colettes, avec un maximum de 160 mW m^{-2} au contact sub-vertical granite des Colettes-micaschistes 2. Au SSW, le flux est inférieur à 120 mW m^{-2} dans les micaschistes 1 de couverture faiblement conducteurs. C'est dans le granite de Beauvoir que l'on observe la plus forte hétérogénéité de flux vertical. Le flux moyen dans le forage est supérieur à 150 mW m^{-2} à proximité de la surface, augmente en profondeur entre les cotes 500 et 800 m , pour diminuer jusqu'à 120 mW m^{-2} dans le faciès micaschiste 2 situé en fond de forage. Les isolignes du flux vertical sont typiques d'un phénomène de réfraction thermique résultant du contraste de conductivités élevé entre différents faciès, déjà mis en évidence sur d'autres cibles par England et al. (1980), Gable (1984), Danis et Royer (1985).

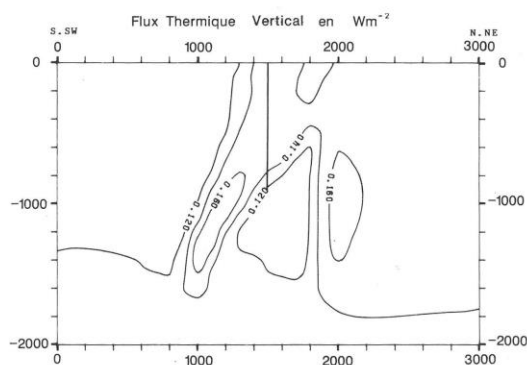


Fig. 8. — Flux géothermique vertical évalué par modélisation numérique suivant une coupe verticale.
Vertical heat flow density evaluated from the numerical modelling.

Dans le détail, on remarque que le flux vertical sur les limites latérales n'est pas conservatif. Ceci montre que l'influence de la réfraction thermique s'étend au-delà des limites de la zone modélisée et que dans la réalité la condition de flux nul sur les limites latérales n'est pas vérifiée. Le choix des

conditions aux limites s'avère très délicat pour modéliser les transferts thermiques autour d'Echassières. En effet, il est possible de satisfaire les conditions de flux nul en étendant la zone d'étude à un domaine de 6 km centré sur le forage, en faisant l'hypothèse peu réaliste d'une continuité géologique. La comparaison entre les températures dans le forage calculées avec ce type de conditions aux limites et sur un domaine plus restreint (3.1) montre un écart maximum d'environ 0.5 °C. Ceci montre que les résultats au centre du domaine, et plus particulièrement au niveau du forage sont peu sensibles au type de conditions latérales imposées. C'est la raison pour laquelle nous avons préféré présenter les résultats pour une zone restreinte sur laquelle la géologie est à peu près connue, même si les conditions aux limites adoptées sont légèrement « fausses » du point de vue thermique. On notera par ailleurs que la distribution du flux géothermique est très semblable à celle publiée sur un cas d'école par Danis et Royer (1985).

Enfin, il faut souligner que ces résultats sont valables pour le modèle de géologie retenu compatible avec la reconnaissance actuelle d'Echassières (forage 900 m). Les extensions latérales et en profondeur proposées sont en fait hypothétiques. Un modèle géologique différent (présence d'une intrusion granitique au-dessous de Beauvoir ou latéralement, absence du granite de la Bosse) nécessiterait une nouvelle modélisation thermique. Le nombre de degrés de liberté du système est trop élevé et ne permet pas de trouver par méthode inverse une solution unique vérifiant les températures observées dans le forage.

4. — Conclusion

Les conductivités thermiques mesurées à Echassières ont des valeurs classiques pour les types de roches rencontrées, que ce soient les micaschistes ou le granite. La relation établie par Koutsikos (1985), donnant la conductivité thermique des roches granitoïdes en fonction de la teneur en quartz, s'applique aux valeurs mesurées sur les faciès de Beauvoir.

Le modèle de transfert thermique adopté permet de retrouver les températures mesurées dans le forage avec une précision tout à fait satisfaisante, compte tenu des simplifications (problème traité en bidimensionnel, distribution schématisée des conductivités thermiques, incertitude sur la géométrie,...). Ce modèle implique un flux géothermique régional moyen de 135 mW m⁻², valeur relativement élevée que l'on peut rapprocher de certaines mesures sur forages publiées par Vasseur (1982) pour le Massif central.

Du point de vue méthodologique, ces résultats montrent que le calcul direct d'un flux de chaleur, sans tenir compte des transferts thermiques mis en jeu autour du site de mesure, conduit parfois à des résultats erronés, comme cela avait déjà été montré par les auteurs sur un autre site (Danis et Royer, 1986).

Remerciements

Ce travail a été réalisé avec une participation financière du Programme GPF, décision 86/54. Les auteurs remercient tout particulièrement Monsieur Jolivet pour son aide et ses conseils.

Références bibliographiques

- AUBERT G. (1969). — Les coupoles granitiques de Montebbras et d'Echassières et la genèse de leurs minéralisations. Mémoire BRGM, **46**, 349 p.
- BALLING N., HAENEL R., UNGEMACH P., VASSEUR G., WHEILDON J. (1981). — Preliminary guidelines for heat flow density determination. Ed. *Commission of the European Communities*, Luxembourg, 33 p.
- BERNIER S., BOUCHEZ J.L., ROCHETTE P. (1987). — Anisotropie de la susceptibilité magnétique du granite de Beauvoir (sondage GPF d'Echassières, Massif Central français). (ce volume).
- BIRCH F., ROY R.F., DECKER E.R. (1968). — Heat flow and thermal history in New-England, New York, 437, *Studies of Appalachian Geology (Northern and Maritime)*. Interscience, 475 p.
- BURNOL L., VIALLEFOND L. (1984). — Géochimie complémentaire en sols à Echassières (Allier), résultats préliminaires. Documents BRGM, 81-8, p. 57-86.
- CUNEY M., AUTRAN A., BURNOL L., BROUAND M., DUDOIGNON P., FEYBESSE J.L., GAGNY C., JACQUOT T., KOSAKEVITCH A., MARTIN P., MEUNIER A., MONIER G., TEYGYEY M., (1986). — Résultats préliminaires apportés par le sondage GPF sur la coupole de granite albitique à topaze-lépidolite de Beauvoir (Massif Central France), *C.R. Acad. Sci., Fr.*, **303**, 11-7, pp. 569-574.
- CUNEY M., AUTRAN A., BURNOL L. (1985). — Premiers résultats apportés par le sondage GPF de 900 m réalisé sur le granite sodolithique et fluoré à minéralisation disséminée de Beauvoir, (complexe granitique d'Echassières, Massif Central, France). *Chron. rech. min.*, **481**, pp. 59-63.
- DANIS M., ROYER J.J. (1985). — Validity of geothermal heat flow density estimation. *Ann. Geophysicae*, **3**, 3, pp. 357-363.
- DANIS M., ROYER J.J. (1986). — Comportement hydrogéologique et thermique de la nappe des Grès du Trias Inférieur dans le secteur de Vittel. *Sci. Terre, Sér. Inf. Géol.*, **25**, Nancy, pp. 33-56.
- DEGOUY M., BRETON J.P. (1985). — Rapport d'exécution du forage d'Echassières n°1. Documents BRGM, 100-8, pp. 1-11.
- ENGLAND P.C., OXBURGH E.R., RICHARDSON S.W. (1980). — Heat refraction and heat production in and around granite plutons in north-East England, *Geophys. J.R. astr. Soc.*, **62**, pp. 439-455.
- FAVIN H., MILLON R. (1984). — Campagne de sondages électriques sur la coupole d'Echassières (Allier). Documents BRGM, 81-8, pp. 41-56.
- GABLE R. (1984). — Temperature disturbances observed in sedimentary basins and their interpretation. *Thermal Phenomena in Sedimentary Basins*, Ed. Technip, pp. 55-63.
- GABLE R., FOUCHER J.C. (1985). — Études thermiques préliminaires., Documents BRGM, 100-8, pp. 280-292.
- GAGNY C., JACQUOT T. (1986). — Présentation de quelques problèmes mis en évidence par la pétrologie structurale. Forage profond Echassières n°1 sur le granite de Beauvoir. Documents BRGM, 100-8, pp. 137-164.
- GARNIER M. (1982). — Données et statistiques sur les températures dans le sol en France. Ed. *Ministère des transports*, Direction de la Météorologie, Boulogne-Billancourt, 198 p.
- JACQUEMIN P., MALLET J.L., ROYER J.J. (1985). — Interactive computer aid design in the processing of mining and geological data. *The Role of Data in Scientific Progress*, ed. Ph. Glaeser, Codata, North-Holland, Amsterdam, pp. 19-24.

- KAPPELMEYER O., HAENEL R. (1974). — Geothermics with special reference to application. *Geoeexploration Monographs*, Series 1, **4**, 238 p.
- KOUTSIKOS E. (1985). — Nouvelles méthodes de détermination de la conductivité thermique des roches granitoides à partir de données minéralogiques et géochimiques — Application aux forages non carottés. Thèse Doct., Univ. Pierre et Marie Curie, Paris, 196 p.
- LACHENBRUCH A.H. (1968). — Preliminary geothermal model of the Sierra Nevada. *J. Geophys. Research*, **73**, n° 22, pp. 6 977-6 989.
- MALLET J.L. (1971). — Étude numérique de l'équation de diffusion — problème direct — problème inverse. Thèse Doc., Univ. Nancy, 182 p.
- ROYER J.J., DANIS M. (1987). — Mise en évidence de phénomènes de réfraction thermique entre le granite de Beauvoir et son encaissant : mesures et modélisation., Documents du BRGM n°124.
- SCLATER J.G., JAUPART C., GALSON D. (1980). — The heat flow through oceanic and continental crust and the heat loss of the earth., *Rev. Geoph. Space Phys.*, **18**, n°1, pp. 269-311.
- VASSEUR G. (1982). — Synthèse des résultats de flux géothermique en France. *Ann. Géophysique*, **38**, n°2, pp. 189-201.
- VIGNERESSE J.L., MENICHETTI V., CANNAT M. (1984). — Couverture géophysique du Massif d'Echassières. Documents BRGM, 81-8, pp. 31-40.
- VIGNERESSE J.L., MENICHETTI V., CANNAT M. (1985). — Interprétation gravimétrique du massif granitique d'Echassières. Documents BRGM, 95-8, pp. 81-91.