

Distribution de la production de chaleur en profondeur dans le sondage d'Échassières et comparaison avec d'autres sondages profonds

J.L. Vignerese*, M. Cuney**

Mots-clés : Uranium, Thorium, Potassium, Granite, Sondage, Flux chaleur (Production chaleur).

Allier (Échassières)

Résumé

Les éléments producteurs de chaleur ne sont pas répartis de façon homogène dans la croûte. La loi de Birch, relation linéaire entre le flux et la production de chaleur, étaye cette hypothèse. Des modèles théoriques de répartition discontinue, linéaire ou exponentielle sont associés à la loi. Ils n'ont pu être vérifiés directement. Les mesures de la production de chaleur en sondage dans des granites peuvent servir à tester ces modèles.

Dans le sondage d'Échassières, la distribution de U, Th et K varie suivant les faciès rencontrés. Les teneurs en U sont relativement élevées (de 2.4 à 52.0 ppm) alors que les teneurs en Th sont très faibles (de 0.14 à 1.7 ppm) par rapport à la moyenne des teneurs des granites (respectivement 4 et 19 ppm). Dans la partie supérieure (de 110 à 480 m) la teneur en uranium croît légèrement (de 10 à 15 ppm) pour devenir ensuite constant à environ 15 ppm. Le thorium décroît nettement dans la partie la plus haute (de 1.7 à 0.9 ppm entre 110 et 160 m), puis plus lentement (jusqu'à 0.44 ppm à 480 m). Les teneurs en thorium sont également plus régulières dans la partie inférieure du forage. Dans le faciès supérieur (de 110 à 480 m) le potassium passe de 3.3 à 3.5% en poids d'oxyde et reste constant à 3.8% dans le faciès inférieur. La production de chaleur augmente avec la profondeur jusqu'à 480 m (de $3.6 \pm 4.2 \pm .2 \mu\text{W}/\text{m}^3$) puis est constante à $4.3 \pm .4 \mu\text{W}/\text{m}^3$.

Nous comparons ensuite ces mesures à celles de différents sondages dans le Wyoming (GM-1), l'Illinois (UPH-3), l'Ontario (ATK-1) et enfin le Massif central (AUR-1). Ces sondages n'ont aucun caractère commun dans leur mode de répartition de la production de chaleur. Les valeurs prédites par les lois de Birch respectives de chacune des provinces et celles observées ne permettent pas de conclure quant à la validité d'un modèle de distribution. Les mesures en forages intragranitiques ne sont donc pas pour l'instant représentatives de la distribution globale des éléments radiogéniques dans la croûte mais reflètent essentiellement la typologie d'origine des granites et les modalités de leur différenciation.

Abstract

Heat production distribution with depth in the Échassières borehole and related deep intragranitic boreholes.

Geothermal studies commonly assume that heat production is non randomly distributed with depth in the earth crust. Surface heat flow and surface heat production present a linear correlation known as the Birch's law. Such a law may be modeled by several types of heat producing elements distribution with depth. Amongst them, a step, a linear or an exponential model are usually assumed though no factual data have yet demonstrated their validity. Intragranitic deep boreholes may be used to validate these assumptions.

We analysed the U, Th and K content in the Échassières deep (900 m) hole drilled within an Hercynian granite in the French Massif central and computed the heat production distribution with depth. Obviously, two modes of variation of the heat producing elements are encountered which depend upon the granite facies variation. In this peraluminous granite, the U content is high (from 2.4 to 52.0 ppm) while the Th content is quite low (from 0.14 to 1.7 ppm) compared to usual granitic values (respectively 4 and 19 ppm). The upper facies (110 to 480 m) presents a slight increase in U (from 10 to 15 ppm), a neat decrease (from 1.7 to 0.9 ppm at 160 m) followed by a moderate decrease in Th (down to 0.44 ppm at 480 m) and a low (from 3.3 to 3.5%) decrease in K_2O . In the lower facies (from 480 to 800 m), the U, Th and K contents are nearly constant (about 15 and 0.5 ppm, and 3.8% respectively). The heat production increases with depth in the upper facies from 3.6 to $4.2 \pm .2 \mu\text{W}/\text{m}^3$ and then is constant in the lower facies at $4.3 \pm .4 \mu\text{W}/\text{m}^3$.

A comparison is attempted between various data on the heat production content within selected boreholes. Examples are scarce, but we describe four other sites from Wyoming (GM-1), Illinois (UPH-3), Ontario (ATK-1) and French Massif central (AUR-1). The five sites, including the present one (ECH-1) present different characteristics from which no clear trend can be sorted out. We also computed the theoretical heat production at depth as predicted from the depth parameter obtained from the heat flow/heat production respective relationship. In the four analyzed boreholes, no correspondance may be obtained between any crustal distribution model and the heat production measured at the bottom of the borehole. We therefore conclude that heat production distribution within batholiths cannot be used to provide constraints on the overall distribution model within the crust. A possible bias may be due to the shallow depth of present boreholes, but we suggest that the heat production values better reflect the granitic differentiation process than the crustal distribution of radiogenic elements with depth.

* Laboratoire de Tectonophysique Université de Nantes, 44072 Nantes Cedex 03
** CREGU et GS - CREGU B.P. 23, 54501 Vandœuvre-les-Nancy Cedex

La distribution en profondeur des éléments radiogéniques dans la croûte n'est pas aléatoire. Ceux-ci font partie des éléments LIL (ion de grande taille à caractère magmatophile) et sont donc sensibles à tout événement magmatique. En conséquence, ces éléments, et parmi eux, ceux producteurs de la chaleur (U, Th, K) sont essentiellement concentrés dans la partie supérieure de la croûte. La connaissance de leur mode de répartition est nécessaire pour comprendre le mécanisme de la différenciation de la lithosphère, donc de sa formation et de son évolution. On étudie dans ce but la genèse et la répartition des roches en fonction de leur degré de différenciation. Une autre façon de procéder consiste à mesurer la quantité de chaleur dégagée par ces éléments. On utilise alors simultanément la chaleur transmise (flux de chaleur) et la chaleur produite (production de chaleur) dans la croûte. Ces deux quantités sont reliées entre elles de façon linéaire par une relation empirique : la loi de Birch (Roy *et al.*, 1968). La pente (D) de la droite ainsi obtenue à la dimension d'une longueur et détermine le paramètre de variation de la distribution de chaleur en fonction de la profondeur (fig. 1). Trois modèles sont souvent retenus qui satisfont à la loi de Birch (Lachenbruch, 1971). Le premier, ou modèle à saut discontinu, admet que la production de chaleur est constante dans

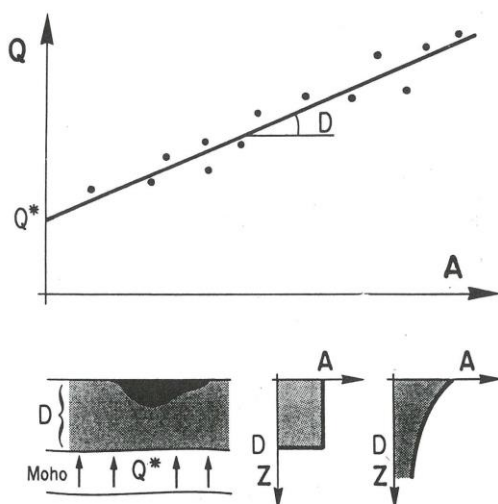


Fig. 1. — Diagramme de la loi de Birch: le flux de la chaleur (Q) est porté en fonction de la production de chaleur (A).

La pente de la droite est le paramètre qui règle la distribution de la production de chaleur en profondeur.

Deux modèles (step et exponentiel) sont représentés.

Q* est le flux réduit qui provient de sous la zone enrichie.

Schematic representation of the Birch's law.

Heat flow (Q) is plotted against heat production (A).

The slope of the linear relationship determines the heat distribution with depth. Q* is the reduced heat flow coming from beneath this enriched zone.

Two models (step and exponential model) are represented on the right.

une couche d'épaisseur D. Dans le second, la production de chaleur varie de façon linéaire depuis la surface jusqu'à une valeur nulle à une profondeur 2D. Enfin, dans le dernier modèle, la production de chaleur décroît exponentiellement

jusqu'à environ une profondeur 3D, le terme exponentiel est pondéré par un terme en $-1/D$. Cette dernière distribution a l'avantage de survivre à l'érosion au cours du temps et d'expliquer les distributions observées dans des régions d'âge thermique et de structure crustale différents. Les paramètres de profondeur observés actuellement sont généralement élevés, soit environ 10 km (Jaupart, 1983) dans la croûte précambrienne, et 17 km dans la croûte hercynienne de Bretagne (Vignerresse *et al.*, 1987) ou de l'Angleterre du sud (Lee *et al.* 1987).

Mesures

Nous reportons ici les analyses en U, Th et K effectuées dans le sondage profond d'Échassières (900 m). Les mesures ont été effectuées par la méthode ICP au CRPG Nancy pour les oxydes majeurs et le potassium, U et Th ont été déterminés par analyse à activation neutronique au laboratoire Pierre Süe à Saclay (Rossi *et al.*, ce volume et Rossi *et al.*, Raimbault *et al.*, Doc. BRGM n°124). L'échantillonnage représente 67 poudres réparties entre 101,1 et 882,5 m, soit un pas d'échantillonnage d'une dizaine de mètres.

La quantité de chaleur est déterminée par l'équation :

$$A = 0,097 [K] + 0,261 [U] + 0,072 [Th]$$

Cette formule implique une densité constante de 2,7, des valeurs pour K₂O en pourcentage d'oxyde et en ppm pour U et Th. Les valeurs de la production de chaleur sont alors données en $\mu\text{W}/\text{m}^3$.

Les variations des teneurs en éléments radiogéniques (U, Th, K) ainsi que la production de chaleur (A) sont présentées en fonction de la profondeur (fig. 2). Une première description des teneurs ainsi que de la minéralogie des éléments porteurs est publiée (Cuney et Brouand, ce volume). Les teneurs en U et Th du granite ne sont pas dans la moyenne habituelle des granites (4 et 19 ppm respectivement). Ces valeurs varient entre 2,4 et 52,0 ppm pour U et entre 0,14 et 1,7 ppm pour Th. Cependant, certaines de ces valeurs doivent être considérées comme anormales. Les valeurs faibles en U (inférieures à 10 ppm) résultent en partie d'une perte en uranium par altération. La valeur élevée (52,0 ppm) correspond à un faciès particulier ; c'est une aplitte antérieure au granite de Beauvoir. Les teneurs en thorium sont extrêmement faibles et résultent de la très faible solubilité des minéraux accessoires en particulier de la monazite dans les magmas fortement peralumineux (Montel, 1986). On retrouve cet appauvrissement dans les terres rares (Raimbault, 1985) en liaison avec la grande rareté des monazites. Les teneurs varient légèrement avec la profondeur. Dans le faciès supérieur (100-480 m), la teneur de l'U croît de 10 ppm à 15 ppm pour ensuite devenir stable à 15 ppm, hormis les valeurs modifiées dans les zones de fracture. Le thorium décroît dans la partie la plus haute, passant de 1,7 à 0,95 ppm à 160 m, les valeurs décroissent ensuite faiblement pour atteindre 0,44 ppm à 480 m. Dans le faciès inférieur, les valeurs sont stables à environ 0,5 ppm. Le potassium présente peu de variations. Il augmente légèrement de 3,3 à 3,5 % en poids d'oxyde dans le faciès supérieur, puis reste constant à 3,8 %. La production de chaleur a été calculée après avoir supprimé les valeurs anormales en U, puis en prenant une moyenne par palier d'une cinquantaine de mètres. Dans la partie la plus haute, la

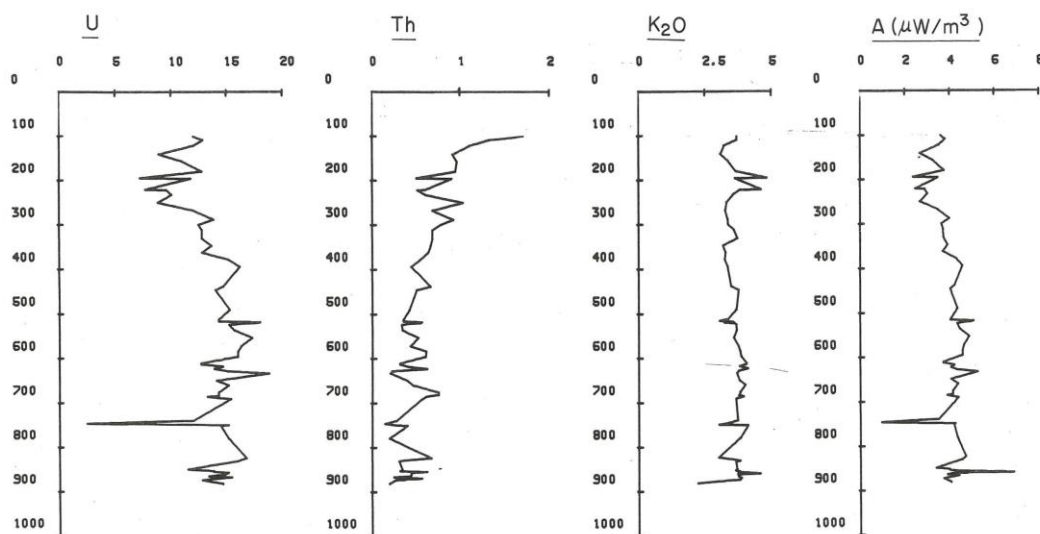


Fig. 2. — U, Th (tous deux en ppm), K_2O (en %) et A (en $\mu W/m^3$) en fonction de la profondeur (en m) dans le sondage d'Échassières (ECH-1)
 U, Th (both in ppm), K_2O (in %) and heat production (A in $\mu W/m^3$) plotted against depth (in m) in the Echassières (ECH-1) borehole.

production de chaleur augmente de $3,6$ à $4,2 \pm 0,2 \mu W/m^3$ avec un gradient d'environ $0,1 \mu W/m^3$ en 80 mètres. Les valeurs se stabilisent à $4,3 \pm 0,4 \mu W/m^3$ après le changement de faciès.

Comparaison avec d'autres sondages intragranitiques

Les sondages profonds dans du matériel granitique sont encore peu nombreux et peu d'entre eux sont décrits simultanément avec les analyses des oxydes majeurs ainsi que U et Th. Des données existent cependant en liaison avec les pro-

grammes de forages profonds ou de gestion de déchets nucléaires. Nous analysons quatre de ces forages. En vue de comparer ces données, des moyennes ont été effectuées par palier après suppression des mesures anormalement appauvries ou enrichies en radioéléments.

GM-1 est un forage situé dans la zone de Granite Mountains dans le Wyoming (USA). Ces plutons d'âge précambrien (2 600 Ma) constituent un bloc de socle précambrien remonté lors de l'orogène Laramide. Ces granites alcalins sont riches en uranium. Le forage d'une profondeur de 405 m traverse d'abord du matériel biotitique riche en U (10 ppm), en Th (50 ppm) et en Pb (50 ppm), puis pénètre du matériel leucocrate de 205 à 405 m relativement riche en U (8 ppm), pauvre en Th (10 ppm) et riche en Pb (55 ppm) (Stuckless et al., 1977).

Forage	Region	age GA	Q^* mW/m^2	D km	A(0) $\mu W/m^3$	d km	A(d) $\mu W/m^3$	Stp(d) $\mu W/m^3$	Lin(d) $\mu W/m^3$	Xpt(d) $\mu W/m^3$
GM-1	Wyoming	2.6	25	6.1 ± 0.9	7.0 ± 0.7	0.4	3.02 ± 0.9	7.0 ± 0.7	6.77 ± 0.7	6.55 ± 0.7
UPH-3	East US	1.4	30	8.1 ± 1.3	23.0 $\pm 3.$	1.0	20.4 ± 0.9	23.0 $\pm 3.$	20.1 ± 2.6	20.3 ± 2.7
ATK-1	Superior	2.4	21	15.6 ± 0.6	1.44 ± 0.15	1.1	1.72 ± 0.24	1.44 ± 0.15	1.38 ± 0.14	1.33 ± 0.14
AUR-1	Bretagne	0.3	21	15.6 ± 0.6	6.1 ± 0.7	1.0	5.73 ± 0.24	6.1 ± 0.7	5.91 ± 0.7	5.70 ± 0.7
ECH-1	Bretagne	0.3	21	15.6 ± 0.6	3.6 ± 0.2	0.9	4.3 ± 0.4	3.6 ± 0.2	3.5 ± 0.2	3.9 ± 0.2

Tabl. 1. — Valeurs de la production de chaleur mesurées en surface A(0) et en fond de forage A(d) à la profondeur (d). Les valeurs calculées Stp(d), Lin(d) et Xpt(d) correspondent aux différents modèles de distribution de la production de chaleur avec la profondeur.

Heat production values measured at the surface A(0) and at the bottom (depth d) of the hole A(d). The calculated values at depth d correspond to the various models used to account for the heat production distribution with depth: step model: Stp(z), Linear model: Lin(z) and the exponential model: Xpt(z).

On retrouve cette distribution dans le log avec un niveau supérieur à production de chaleur plus élevée ($7,2 \pm 4, \mu\text{W}/\text{m}^3$) que le niveau inférieur ($3,5 \pm 2 \mu\text{W}/\text{m}^3$). Les dispersions sur les valeurs sont dues à l'échantillonnage de nombreuses zones de fracture et d'altération avec des enrichissements et pertes importantes en uranium. Après sélection, on obtient pour la partie la plus haute (de 0 à 205 m) une valeur de $7,0 \pm 2 \mu\text{W}/\text{m}^3$.

UPH-3 est un forage profond (1 540 m) dans le précambrien de l'Illinois (USA). Le forage pénètre tout d'abord la couverture métasédimentaire, puis un granite précambrien (1 460 Ma) à 660 m jusqu'à 1 540 m. Un faciès à grain fin à biotite et muscovite est d'abord atteint, et passe ensuite à un granite plus grossier également à deux micas à 740 m (Lidiak et Denison, 1983). Le granite est riche en U (de 16 à 69 ppm), riche en Th (de 50 à 150 ppm). Le Pb est également très abondant (24 à 197 ppm) ainsi que les terres rares. Malgré la grande profondeur du forage (1 540 m) et la pénétration du pluton sur plus de 1 000 m, il n'existe que peu d'analyses publiées (10) sur ce forage (Doe *et al.*, 1983, Rosholt, 1983). Les valeurs de la production de chaleur sont élevées (de 17 à $27 \mu\text{W}/\text{m}^3$) avec une valeur moyenne de $22 \pm 3 \mu\text{W}/\text{m}^3$ du fait de la teneur élevée en éléments radiogéniques. Une légère diminution de la production de chaleur avec la profondeur est notée entre $23,0 \pm 3,0 \mu\text{W}/\text{m}^3$ à 650 m et $20 \pm 0,9 \mu\text{W}/\text{m}^3$ à 1 500 m.

Le forage canadien ATK-1 de l'Atikokan (Ontario) est situé dans le pluton de Eye-Dawsha Lakes. Ce forage d'étude de stockage de déchets nucléaires pénètre un granite à hornblende et biotite à grain moyen à grossier jusqu'à 1 090 m. Le pluton est intrusif dans des gneiss tonalitiques archéens (Sch-

werdtner *et al.*, 1979; Stone et Kamineni, 1982). Peu d'analyses (10) sont malheureusement disponibles sur ce forage (Gascoyne et Schwarcz, 1986). Les teneurs en éléments radiogéniques sont faibles [U (2 ppm), Th (9 ppm)] et la production de chaleur est donc également faible ($1,6 \pm 0,2 \mu\text{W}/\text{m}^3$). Les valeurs augmentent avec la profondeur et passent de $1,44 \pm 0,15 \mu\text{W}/\text{m}^3$ en surface à $1,72 \pm 0,25$ à 1 100 m.

Le granite d'Auriat (AUR-1), dans le Massif central français fait partie des granites hercyniens mis en place après l'anatexie crustale ayant conduit à la formation des grandes unités de granites du type granite de Guéret (Duthou *et al.*, 1984). Les analyses (Arnaud *et al.*, 1984) ne semblent pas indiquer une grande variation de la production de chaleur. La valeur moyenne est de $5,91 \pm 0,69 \mu\text{W}/\text{m}^3$. Une légère variation existe entre un faciès supérieur ($6,1 \pm 0,7 \mu\text{W}/\text{m}^3$) et un inférieur en dessous de 600 m ($5,73 \pm 0,6 \mu\text{W}/\text{m}^3$). Mais cette différence reste faible et du même ordre que l'écart type. On ne peut donc conclure à une variation de la production de chaleur en profondeur dans ce massif.

La comparaison des productions de chaleur pour ces cinq forages (GM-1, UPH-3, ATK-1, AUR-1, ECH-1) ne fait pas ressortir de corrélation évidente. Les diagrammes (fig. 3) sont tracés à la même échelle et en reportant chacun des sondages par rapport à son niveau dans le granite. Le forage UPH-3 est remonté à 660 m et est tracé avec une production de chaleur variant de 16 à $26 \mu\text{W}/\text{m}^3$. Aucune caractéristique commune n'apparaît entre ces logs. GM-1 présente une décroissance de la production de chaleur liée à un changement de faciès. Celle-ci décroît également dans UPH-3 avec des sauts brusques, mais le faible nombre d'analyses empêche toute interprétation. Les valeurs dans ATK-1 sont

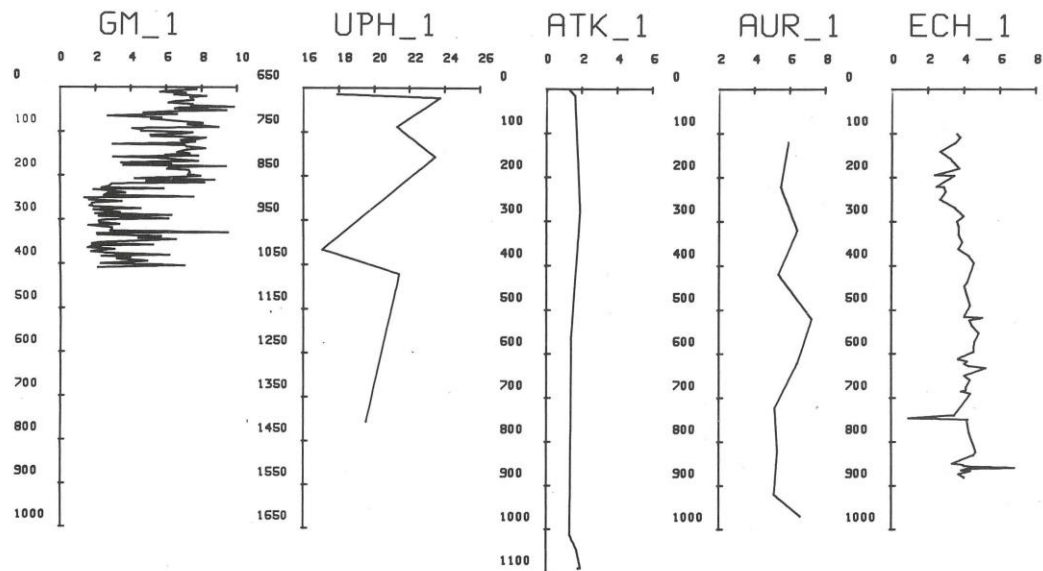


Fig. 3. — Comparaison de la production de chaleur en fonction de la profondeur dans cinq forages intragranitiques. Il n'est pas évident de trouver une loi de variation générale entre ces mesures. Les échelles verticales et horizontales sont identiques dans les logs. Comparison of the heat production values as a function of depth in five deep intragranitic boreholes. The horizontal and vertical scales are similar on all logs. No definite trend is observed in the curves.

trop faibles pour déceler une variation. Dans le massif d'Auriat (AUR-1) la variation est inexistante. Dans le sondage d'Échassières, la production de chaleur augmente tout d'abord dans la partie supérieure du forage et reste ensuite constante.

Relation avec les modèles de distribution de la production de chaleur en profondeur

Dans le but de comparer les variations de la production de chaleur à des modèles compatibles avec la loi de Birch, nous avons repris les données géothermiques des différentes provinces considérées et calculé les variations de chacune d'entre elles. Nous utilisons les données concernant les provinces du Wyoming (Decker et al., 1981), de l'est des États-Unis (Lachenbruch et Sass, 1977), de la province supérieure (Jessop et Lewis, 1978) et de la croûte hercynienne (Vigneresse et al., 1987). Pour Auriat et Échassières, nous utilisons les mesures géothermiques sur la Bretagne plutôt que celles du Massif central (Lucazeau et Vasseur, 1981) car ces dernières n'indiquent pas de corrélation entre flux et production de chaleur. Ceci n'est pas dû à une modification de la loi de Birch, mais résulte des perturbations liées aux remontées de l'asthénosphère à l'Oligocène et aux phénomènes volcaniques associés. L'utilisation de la loi de répartition, vérifiée sur la croûte hercynienne dans l'Ouest de la France (Vigneresse et al., 1987) et dans le sud de l'Angleterre (Lee et al., 1987) est justifiée dans la mesure où le présent travail n'examine que la production de chaleur et non pas le flux. Cette répartition paraît applicable à toute la croûte hercynienne (Vigneresse, 1987).

Les paramètres géothermiques (D fig. 1) sont respectivement de 6,1, 8, 14 et 16 km. Ces valeurs représentent chacune un type de province géothermique. Elles sont différentes car les régions impliquent de l'archéen, du précambien ou de la croûte paléozoïque. Connaissant les valeurs de la production de chaleur en surface, nous calculons la valeur théorique en fond de forage. Cette valeur calculée est comparée aux mesures. Aucun des modèles n'est véritablement satisfaisant et ni le modèle à saut discontinu, ni le modèle linéaire, ni le modèle exponentiel ne peuvent être raisonnablement appliqués. Nous proposons donc que, soit ces données ne sont pas représentatives à cette échelle, soit ces modèles ne s'appliquent pas.

Le problème de la représentativité de notre échantillonnage est en effet posé. Les forages ont une profondeur de 1 km de terrain environ par rapport à une profondeur géothermique allant de 6 à 16 km, soit environ 10%. Il est donc fort probable que les forages ne soient pas assez profonds pour être représentatifs de la distribution de la production de chaleur en profondeur et que les variations observées ne reflètent que les changements de faciès.

La validité d'un des modèles ne pourrait donc être testée que par un forage plus profond. Le forage très profond effectué dans la presqu'île de Kola (12 064 m) (Kremenetsky et al., 1986) est de ce fait plus représentatif que les forages examinés. Ce forage traverse une grande variété de terrains englobant globalement des roches métavolcaniques (0 à 1 059 m), des métasédiments (1 059 - 2 805 m), une unité de metabas-

saltes tholéitiques (2 805 - 4 673 m), un faciès de gneiss amphibolitiques avec des intercalations volcaniques (4 673 - 6 823 m) et enfin une série archéenne alternée de gneiss et de schistes à biotite et muscovite (6 823 - 12 064 m). La production de chaleur est extrêmement variable entre 0,17 et 2,36 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ (Kremenetsky et al., 1986). Les valeurs augmentent entre 0 et 6 800 m, passant de 0,17 à 0,67 $\mu\text{W}/\text{m}^3$. Après un palier à 1,94 à $\mu\text{W}/\text{m}^3$, les valeurs oscillent ensuite entre 1,10 et 2,36 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ par paliers d'environ 700 m jusqu'à 12 km. Ces valeurs décroissent ensuite par sauts successifs entre 12 et 20 km (0,60 $\mu\text{W}/\text{m}^3$) et ensuite à 0,15 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ jusqu'à 30 000 m. Ces valeurs sont obtenues par extrapolation avec des données observées dans des forages d'Ukraine situés dans une partie plus érodée du socle. Ce forage ne reflète donc pas la distribution de la production de chaleur avec la profondeur attendue par la loi de Birch.

Une autre interprétation au manque de corrélation entre mesures et modèles est avancée par Sawka et Chappell (1985). Dans le batholithe de la Sierra Nevada, ces auteurs construisent un diagramme de la répartition de chaleur selon l'altitude des échantillons dans le batholithe. Ils constatent alors un certain enrichissement en U et Th, donc en production de chaleur lié à l'altitude d'échantillonnage dans le massif de Tinemaha. Cette variation, observée entre 3 000 et 4 200 m résulte des phénomènes de fractionnement dus à une répartition des minéraux accessoires de façon exponentielle liée à un modèle de différenciation de la chambre magmatique. Dans ce cas, la répartition de U et de Th dans un granite ne serait représentative que du mode de fractionnement de ces éléments dans une chambre magmatique. Elle ne peut donc pas être représentative de la répartition des éléments dans la croûte. Cette remarque est justifiée également par le fait que certains xénolithes remontés par les granites sont quelquefois plus radiogéniques que ces derniers (Sawka et Chappell, 1987). Les observations effectuées dans des forages intragranitiques montrent que la distribution des éléments radiogéniques dans les différents faciès est extrêmement variable et ne peut être représentative d'une loi de distribution crustale. Si dans certains granites, les teneurs en uranium croissent avec la différenciation (Friedrich et al., 1987, Pagel, 1981), les teneurs en Th et en K_2O peuvent décroître, c'est le cas des magmas peralumineux riches en fluor; la décroissance de la production de chaleur est donc minorée dans les termes les moins différenciés situés généralement à une plus grande profondeur dans un édifice granitique simple. Dans d'autres cas, comme à Beauvoir, la teneur en uranium et la production de chaleur globale décroît avec la différenciation. Les variations des teneurs en U et Th sont directement en relation avec les conditions de fractionnement des minéraux accessoires dans ces magmas granitiques. Ainsi les modèles de répartition des éléments radiogéniques combinant la diffusion (Bunterbarth, 1976) ou l'interaction de fluides durant le refroidissement (Albarède, 1975) ne permettent pas d'expliquer les variations observées.

Références bibliographiques

- ALBARÈDE F. (1975). — The heat flow: heat generation relationship: an interaction model of fluids with cooling intrusions. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **27**, pp. 73-78.
- ARNIAUD D., DUPUY C., DOSTAL J. (1984). — Geochemistry of Auriat granite (Massif central, France). *Chemical Geology*, **45**, pp. 263-277.

- BUNTERBARTH G. (1976). — Distribution of uranium in intrusive bodies due to combined migration and diffusion. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **32**, pp. 84-90.
- DECKER E.R., BAKER K.R., BUCHER G.J., HEASLER H.P. (1981). — Preliminary heat flow and radioactivity studies in Wyoming. *J. Geophys. Res.*, **85**, pp. 311-321.
- DOE B.R., STUCKLESS J.S., DELEVAUX M.H. (1983). — The possible bearing of the granite of the UPH Deep Drill Hole Northern Illinois on the origin of the Mississippi valley ore deposit. *J. Geophys. Res.*, **88**, pp. 7 335-7 345.
- DUTHOU J.L., CANTAGREL J.M., DIDIER J., VIALETTE Y. (1984). — Paleozoic granitoids from the French Massif central : age and origin studied by 87Rb-87Sr system. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **35**, pp. 131-144.
- FRIEDRICH M., CUNEY M., POTY B. (1987). — Uranium geochemistry in peraluminous leucogranites. *Uranium*, **3**, pp. 353-385.
- GASCOYNE D.C., SCHWARCZ H.P. (1986). — Radionuclide migration over recent geologic time in a granitic pluton. *Chemical Geology*, **59**, pp. 75-85.
- JAUPART C. (1983). — Horizontal heat transfert due to radioactivity contrats : causes and consequences of the linear heat flow relation. *Geophys. J. R. Astr. on Soc.*, **75**, pp. 411-435.
- JESSOP A.M., LEWIS T. (1978). — Heat flow and heat generation in the Superior province of the Canadian shield. *Tectonophysics*, **50**, pp. 55-77.
- KREMENESTSKI A.A., OVCHINNIKOV L.N. (1986). — The precambrian continental crust : its structure, composition and evolution revealed by deep drilling in the USSR. *Precambrian Res.*, **33**, pp. 11-43.
- LACHENBRUCH A.H. (1971). — Crustal temperature and heat production : implications of the linear heat flow relation. *J. Geophys. Res.*, **75**, pp. 3 291-3 330.
- LACHENBRUCH A.H., SASS J.H. (1977). — Heat flow in the United States and the thermal regime of the crust. In the Earth's crust J.G. HEACOCK ed. *Amer. Geophys. Union Geophys. Mon.*, **20**, pp. 626-675.
- LEE M.K., BROWN G.C., WEBB P.C., WHEILDON J., ROLLIN K.E. (1987). — Heat flow, heat production and thermotectonic setting in mainland UK. *J. Geol. Soc. London*, **144**, pp. 35-42.
- LIDIAK E.G., DENISON R.E. (1983). — Petrology and physical properties of granites from the Illinois deep hole in Stephenson County. *J. Geophys. Res.*, **88**, pp. 7 287-7 299.
- LUCAZEAU F., VASSEUR G. (1981). — Production de chaleur et régime thermique de la croûte du Massif central. *Ann. Geophys.*, **37**, pp. 493-513.
- MONTEL J.M. (1986). — Experimental determination of the solubility of Ce monazite in SiO₂-Al₂O₃-K₂O-Na₂O melts at 800 °C, 2 Kbar under H₂O saturated conditions. *Geology*, **14**, pp. 659-662.
- PAGEL M. (1981). — Facteurs de distribution et de concentration de l'uranium et du thorium dans quelques granites de la chaîne hercynienne d'Europe. Thèse d'État, INPL Nancy, 566 p.
- RAIMBAULT L. (1985). — Étude préliminaire des terres rares dans le granite de Beauvoir. In Programme Géologie Profonde de la France GPF 3, thème 8. *Document BRGM n° 100*, pp.125-136.
- RAIMBAULT L., AZENCOTT C., JORON J.L., GRUFFAT J.J., MOUTTE J., OUIN M.C. (1987). — Analyses de 129 échantillons du massif granitique d'Échassières, dont 67 du sondage GPF. In *Document BRGM n° 124*.
- ROSHOLT J.N. (1983). — Isotopic composition of uranium and thorium in crystalline rocks. *J. Geophys. Res.*, **88**, pp. 7 315-7 330.
- ROSSI P., AUTRAN A., AZENCOTT C., GOVINDARAJU K., MONIER G., RAIMBAULT L., SAUGUES J.C., VIALLEFOND L. (1987). — Sélection des modes analytiques utilisés pour la réalisation du log géochimique du granite de Beauvoir ; Sondage profond GPF-1 Échassières. *Document BRGM n° 124*.
- ROSSI P., AUTRAN A., CUNEY M., JOHAN V., KOSAKEVITCH A., OHNENSTETTER D., MONIER G., PIANOTONE P., RAIMBAULT L., VIALLEFOND L. (1987). — Logs pétrographique et géochimique du sondage GPF - Échassières 1 - Minéralogie et géochimie comparées. (ce même volume).
- ROY R.F., BLACKWELL D.D., BIRCH F. (1968). — Heat generation of plutonic rocks and continental heat flow provinces. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **5**, pp. 1-12.
- SAWKA W.N., CHAPPELL B.W. (1985). — Geothermal implications for the Sierra Nevada batholith from vertical and horizontal compositional zoning studies in contrasting pluton types. In high heat production (HHP) granites, hydrothermal circulation and ore genesis. The Institution of Mining and Metallurgy London, pp. 329-343.
- SAWKA W.N., CHAPPELL B.W. (1987). — Mafic xenoliths from I and S type granitoids : evidence for variations in deep crustal radioactive heat production. *Geophys. Res. Lett.*, **14**, pp. 303-306.
- SCHWERDTNER W.N., STONE D., OSADETZ K., MORGAN J., SCOTT G.M. (1979). — Granitoids complexes and the Archean tectonic record in the southern part of northwestern Ontario. *Can. J. Earth. Sci.*, **16**, pp. 1 965-1 977.
- STONE D., KAMINENI D.C. (1982). — Fractures and fracture infillings in the Eye Dawson Lakes pluton Atikokan Ontario. *Can. J. Earth. Sci.*, **19**, pp. 789-803.
- STUCKLESS J.S., BUNKER C.M., BUSH C.A., DOERING W.P., SCOTT J.H. (1977). — Geochemical and petrologic suite of a uraniferous granite from the Granite Mountains, Wyoming. *J. Res. U.S. Geol. Survey*, **5**, pp. 61-81.
- VIGNERESSE J.L., JOLIVET J., CUNEY M., BIENFAIT G. (1987). — Heat flow, heat production and granite depth in western France. *Geophys. Res. Lett.*, **14**, pp. 275-278.
- VIGNERESSE J.L. (1987). — Heat flow, heat production and crustal structure in Peri Atlantic regions. *Earth Planet. Sci. Lett.*, (sous presse).