

Minéralogie et géochimie de U et Th dans le granite de Beauvoir et les micaschistes encaissants. Comparaison avec la géochimie de l'étain

Michel Cuney* et Marc Brouand**

Mots-clés : Uranium, Thorium, Granite (Granite Beauvoir). Micaschiste, Uraninite, Microlite, Étain.
Allier (Échassières).

Résumé

Le granite albitique à topaze-lépidolite de Beauvoir présente des teneurs en uranium élevées qui décroissent de la base vers le sommet de l'intrusion alors que les éléments incompatibles Sn, F, Li, Ta, Nb ... montrent un fort accroissement. L'uraninite est le principal porteur de l'uranium dans la partie inférieure du granite caractérisée par des rapports U/Ta élevés et le microlite devient l'unique porteur dans la partie supérieure présentant des rapports U/Ta faibles. La diminution de teneurs en uranium résulte d'un caractère plus oxydant du magma dans la partie supérieure de la coupole ayant favorisé, le fractionnement de cet élément dans les fluides expulsés au moment de la sursaturation du magma. L'étain peu mobile en conditions oxydantes reste au contraire essentiellement piégé dans le magma. Cependant, la concentration en chlorures extrêmement élevée des fluides magmatiques a permis le fractionnement d'une partie de l'étain dans les fluides pour produire les halos géochimiques de forte intensité observés dans les micaschistes encaissant le granite de Beauvoir. Le thorium présente au contraire des teneurs extrêmement basses correspondant à un fractionnement très important de la monazite dans le magma parent ou la roche source soumise à la fusion partielle. Le seul porteur identifié de manière certaine est un minéral de composition voisine de la brockite.

Des minéralisations uranifères dont certaines avec la paragenèse Bi, Ni, Co ont été observées dans les micaschistes au toit et à la base du granite de Beauvoir. Des remobilisations récentes (≤ 1 Ma) de l'uranium sont également mises en évidence.

Abstract

Mineralogy and geochemistry in the Beauvoir granite and enclosing micaschists. A comparison with tin geochemistry

The Beauvoir topaze-lepidolite albitic granite presents high uranium contents which decrease from the floor to the roof of the intrusion, whereas incompatible elements Sn, F, Li, Ta, Nb ... increase strongly. Uraninite is the main uranium bearing mineral in the lower half of the granite characterized by high U/Ta ratio, and microlite is the only one in the upper half because of the low U/Ta ratios in the granite. The uranium content decrease results from higher fO_2 conditions in the upper part of the Cupola, which have lead to the partition of uranium into the fluids expelled at the time of magma oversaturation. Despite the very high tin content of the Beauvoir magma, tin mineralized veins are nearly absent around the granite. Tin is weakly soluble in oxidizing conditions and mainly crystallizes as cassiterite in the magma. However the very high salinity of the magmatic fluid has lead to a limited fractionation of tin in this fluid. The tin enrichment expressed as geochemical halos around the Beauvoir granite result from this process. The extremely low Th content of the Beauvoir granite result from the strong fractionation of monazite either in the parent magma or the source rock submitted to partial melting. The only thorium-bearing mineral is a phase close to brockite composition.

Uranium mineralizations, with a Bi, Ni, Co paragenesis occur in the micaschists each side of the Beauvoir cupola. Recent uranium mobilisation and deposition (≤ 1 Ma) have been also evidenced.

* CREGU et GS-CNRS-CREGU, BP 23, 54501 Vandœuvre les Nancy Cedex

** CRPG, BP 20, 54501 Vandœuvre-les-Nancy Cedex

1. — Introduction

Le granite de Beauvoir appartient au complexe granitique d'Échassières. Ce complexe serait constitué d'au moins trois ensembles granitiques (Aubert, 1969) d'âge carbonifère (Duthou et Pin, ce volume) qui par ordre successif de mise en place sont : le granite présumé de la Bosse non affleurant mais considéré comme nécessaire pour expliquer la genèse du stockwerk à ferbélite de la Bosse bréchifié par les deux intrusions suivantes : le granite à 2 micas-cordiérite des Colettes et le granite de Beauvoir. Ce dernier est un granite albitique à topaze lépidolite extrêmement enrichi en F, Li, Sn, Ta, Nb, Be, U.

Ce complexe granitique appartient au type leucogranitique peralumineux très répandu dans la chaîne hercynienne d'Europe et auquel sont associées de nombreuses minéralisations principalement à U, Sn et W. Dans le cadre du programme Géologie Profonde de la France un sondage carotté de 900 m a été réalisé dans le granite de Beauvoir et son encaissant micascisteux (Cuney et al., 1986).

La réalisation du forage profond GPF Échassières n°1 permet d'étudier la géochimie de l'uranium en s'affranchissant des altérations supergènes qui le redistribuent en particulier dans les leucogranites riches en uranium où cet élément est exprimé essentiellement sous forme d'uraninite. L'étude conjointe de l'uranium, très sensible à l'oxydation du milieu et du thorium, bon marqueur de la différenciation dans les granites peralumineux permet de contraindre une partie de l'évolution pétrogénétique du granite de Beauvoir. Une comparaison de la géochimie de l'uranium et de l'étain est réalisée.

L'étude conjointe de la minéralogie de l'uranium a permis d'identifier les porteurs de cet élément et d'apprécier la potentialité métallogénique de ce granite. La présence de chalcopite signalée dans la carrière de kaolin de Beauvoir et l'existence d'indices d'uranium, travaillés par le CEA dans les années soixante renforcent l'intérêt métallogénique de ce secteur.

2. — Méthodes analytiques

A la suite d'une trentaine d'analyses préliminaires réalisées par ICP au CRPG sur des passées décimétriques à métriques de micascistes et de granites du forage (Cuney et Brouand, 1985), et par activation neutronique sur des échantillons de surface du granite des Colettes et sur quelques sondages miniers courts (~ 100 m) implantés dans la carrière de Beauvoir (par Raimbault, communication écrite), des analyses par activation neutronique sur un log géochimique presque continu du granite de Beauvoir ont été effectuées. Les analyses par activation neutronique ont été réalisées au laboratoire Pierre Süe (Saclay) (Raimbault et al., Document BRGM n°125). Les teneurs en Th étant particulièrement faibles (environ 1 ppm) et proches des limites de détection par la méthode ICP, nous n'utiliserons que les données d'activation neutronique pour le granite de Beauvoir. Pour des teneurs supérieures à 1 ppm les valeurs obtenues par ICP sont comparables à celles obtenues par activation neutroni-

que. Enfin un ensemble de mesures U et Th a été réalisé par Piantone et Burnol, ce volume, sur les micascistes du sondage et de surface par fluorescence X. Les teneurs en thorium présentant des teneurs anormalement basses par rapport à celles déterminées par la méthode ICP, elles n'ont pas été prises en considération. L'ensemble des résultats analytiques est présenté dans ce volume (Rossi et al.) dans le volume des annexes (Autran et al.; Piantone et Burnol; Raimbault et Azencott, Document BRGM, n° 124).

| | -94,55 m | | | -553,74 m | | -830,60 m | | |
|--------------------------------|----------|-------|-------|-----------|-------|-----------|--------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | coeur | bord | coeur | bord | bord |
| UO ₂ | 92.66 | 93.72 | 81.21 | 85.60 | 82.12 | 92.71 | 93.70 | 92.98 |
| ThO ₂ | 0.35 | 0.44 | 1.14 | 0.52 | 0.14 | 0.26 | 0.11 | 0.59 |
| PbO | 4.24 | 4.62 | 0.00 | 0.79 | 0.39 | 3.76 | 4.70 | 4.04 |
| Nb ₂ O ₃ | 0.58 | 0.41 | 0.17 | 0.00 | 0.00 | 0.21 | 0.60 | 0.10 |
| ZrO ₂ | n.a. | n.a. | n.a. | 0.00 | 0.00 | 0.09 | 0.63 | 0.05 |
| SiO ₂ | n.a. | n.a. | n.a. | 0.10 | 0.17 | 0.00 | 0.13 | 0.32 |
| CaO | n.a. | n.a. | n.a. | 1.86 | 1.57 | 0.00 | 0.01 | 0.00 |
| MnO | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.70 | 0.44 | 0.01 | 0.00 | 0.00 |
| FeO | 0.00 | 0.07 | 0.77 | 0.00 | 0.06 | 0.06 | 0.18 | 0.29 |
| TiO ₂ | 0.00 | 0.07 | 0.04 | 0.12 | 0.00 | 0.05 | 0.10 | 0.11 |
| Ta ₂ O ₃ | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| TOTAL | 97.85 | 99.34 | 83.32 | 89.69 | 84.87 | 97.15 | 100.17 | 98.47 |
| Age Ma | 294 | 317 | | 59 | 31 | 262 | 326 | 277 |

| | -837,46 m | | | | | | | | | |
|--------------------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|----------|--|--|
| | bord | coeur | bord | bord | coeur | bord | uraninite | corrodée | | |
| | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | | |
| UO ₂ | 93.04 | 92.41 | 92.43 | 91.01 | 92.09 | 93.19 | 45.22 | 87.53 | | |
| ThO ₂ | 0.68 | 0.48 | 1.97 | 2.33 | 0.40 | 0.30 | 0.45 | 3.53 | | |
| PbO | 4.52 | 3.84 | 4.46 | 4.31 | 3.98 | 4.21 | 0.00 | 4.06 | | |
| Nb ₂ O ₃ | 0.00 | 0.28 | 0.22 | 0.22 | 0.00 | 0.09 | 0.00 | 0.00 | | |
| ZrO ₂ | 0.03 | 0.01 | 0.13 | 0.08 | 0.14 | 0.00 | 0.19 | 0.00 | | |
| SiO ₂ | 0.11 | 0.04 | 0.00 | 0.26 | 0.01 | 0.14 | 7.48 | 1.33 | | |
| CaO | 0.07 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.04 | 0.52 | 0.04 | | |
| MnO | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.04 | 0.09 | 0.02 | 0.13 | 0.00 | | |
| FeO | 0.05 | 0.03 | 0.08 | 0.11 | 0.02 | 0.00 | 17.27 | 0.13 | | |
| TiO ₂ | 0.05 | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.06 | 0.00 | | |
| Ta ₂ O ₃ | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | |
| TOTAL | 98.25 | 97.14 | 99.33 | 98.37 | 96.80 | 97.98 | 71.32 | 96.61 | | |
| Age Ma | 289 | 266 | 292 | 283 | 278 | 292 | | 264 | | |

Tabl. 1. — Analyses microsonde sélectionnées d'uraninite dans le granite (-553,74, -833,60, -837,46 m) et une apélite (-94,55) greisénisée du sondage GPF Échassières n°1.

Les âges chimiques en Ma ont été calculés à partir des teneurs en U, Th et Pb (n.a. = non analysé)

Selected microprobe analysis of uraninite from the GPF drill hole, Beauvoir granite.
Chemical ages have been calculated from U, Th and Pb contents.

Les minéraux contenant les radioéléments ont été analysés à la microsonde électronique CAMEBAX du Service Commun d'Analyse de l'Université de Nancy I avec les conditions suivantes : 15 KV, 20 nA, comptage 6 à 10 s, les standards sont pour la plupart des oxydes des éléments analysés et des monazites synthétiques pour les terres rares, le programme de correction est de Henoc et Tong (1978).

Une étude de l'état d'équilibre a été réalisée sur 3 échantillons de minéralisation uranifère par spectrométrie α . Il permet de contraindre la mobilité de l'uranium et de ses descendants lors de processus d'altération récents (≤ 0.5 Ma). Après dissolution totale de l'échantillon par attaque acide (HNO₃ + HClO₄ + HF) le traceur ²³²U d'activité connue et équilibré avec son descendant ²³⁸Th est ajouté. Une première séparation sur résine anionique permet de séparer U et Th. Ensuite U et Fe sont séparés sur résine anionique et ensuite purifiés par extraction au TTA - benzène. Le comptage α est ensuite réalisé en vue de la détermination des activités de

de ^{234}U , ^{230}Th et ^{238}U . Les teneurs en uranium de l'échantillon peuvent également être estimées.

Un repérage systématique des minéraux porteurs des radioéléments a été réalisé sur toutes les lames minces étudiées par autoradiographie α .

3. — Minéralogie des porteurs de U et Th

a) Le granite de Beauvoir

Plusieurs minéraux porteurs de radioéléments ont été caractérisés. Il s'agit de minéraux ayant cristallisé au stade magmatique : uraninite, microlite, zircon, brockite, monazite (?) et apatite ou lors d'altérations : pechblende, uranotitanate riche en niobium non identifié, plumbogummite et chalcolite.

L'uraninite n'a pas été observée dans les échantillons de la carrière de Beauvoir, dans les sondages miniers et dans le faciès B 1. Elle apparaît dans les faciès B 2 et B 3 ainsi que dans les filons d'aplite injectés dans les micaschistes du toit et de la base où elle peut être très abondante (jusqu'à 7 cristaux par lame mince). Elle forme généralement des cristaux automorphes de 10 à 50 μm , cubiques ou octaédriques. Localement, elle apparaît plus ou moins fortement corrodée comme par exemple à -837,46 m. Ceci indique qu'une partie de l'uranium a été redistribuée ou lessivée dans cet échantillon. Elle est incluse dans la plupart des minéraux essentiels et accessoires du granite, ce qui évoque un intervalle de cristallisation très étendu pour ce minéral. Elle a été observée en association fréquente avec des cristaux de zircon et parfois de la pyrite comme dans l'aplite à -90,73 m. Elle apparaît également dans une apatite greisenisée (-94,55) en inclusion dans du quartz où elle forme une association remarquable avec de la scheelite et de la wolframite (Fig. 1 d). Dans la lépidolite, elle développe une auréole sombre d'environ 20 μm d'épaisseur. Dans une apatite à -834,25 m elle est associée à du zircon et entourée de fluorine. Enfin elle peut être en association de type syn croissance avec de la columbite (-98,38 m). Dans ce dernier échantillon elle est totalement pseudomorphosée par de la chalcolite ($\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 8-12 \text{H}_2\text{O}$) (fig. 1e).

Du point de vue géochimique (tabl. 1) les uraninites présentent des concentrations détectables, par ordre d'importance, de Pb, Th et Nb. Les concentrations de ces éléments sont extrêmement variables. La teneur en plomb varie en fonction du degré d'altération (4,70 à 0 % poids). Le cœur des cristaux est fréquemment plus pauvre que leur bordure. Ceci suggère une diffusion du plomb en dehors du réseau de l'uraninite même dans les cristaux ne présentant pas d'évidence d'altération. La plupart des âges chimiques calculés (tabl. 1) sont inférieures à celui du granite (315 Ma, Duthou et Pin, ce volume). Ils indiquent donc une diffusion du plomb hors de l'uraninite.

Les teneurs en thorium varient de 3,5 à 0,1 % poids mais les teneurs les plus fréquentes sont de l'ordre de 0,5 % poids. Le bord des cristaux est généralement plus riche que le cœur, cependant l'inverse peut parfois s'observer. Les valeurs les plus élevées étant généralement localisées vers le bord des cristaux qui ont tendance à être les plus altérés, il est possible qu'elles résultent au moins en partie d'une reconcentration locale du thorium. Pour une teneur moyenne en uranium de

15 ppm dans la roche totale sous forme d'uraninite à 0,5 % de thorium, la contribution de l'uraninite à la teneur en thorium de la roche n'est que de 0,08 ppm.

Le niobium est fréquemment détecté dans les analyses (0 à 0,6 % poids), mais les teneurs sont proches de la limite de détection dans les conditions analytiques utilisées.

Zr apparaît parfois mais en concentrations voisines de la limite de détection de la microsonde. Si, Ca, Mn et Fe apparaissent dans les uraninites altérées (marquées par un déficit en uranium et un mauvais bouclage de l'analyse. Ces phénomènes sont particulièrement accentués lorsque l'uraninite présente des figures de corrosion (tabl. I, n° 15 et 16).

La microlite (20 à 600 μm) renferme une partie importante du stock d'uranium (5 à 12 % du poids UO_2) dans le granite de Beauvoir et en particulier dans le faciès B1 où l'uraninite n'a pas été observée et où les teneurs en tantale sont très élevées. Quelques analyses sont présentées dans le tabl. II. Une analyse systématique de ces minéraux a été réalisée par

| | -401 m | | | ES 20 - 4 | | |
|-------------------------|--------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | coeur | bord | |
| Ta_2O_5 | 59.22 | 57.29 | 58.23 | 67.09 | 69.86 | 65.48 |
| Nb_2O_5 | 11.72 | 11.11 | 11.32 | 4.53 | 4.81 | 4.04 |
| UO_2 | 9.54 | 9.63 | 10.81 | 6.69 | 9.25 | 9.27 |
| CaO | 6.64 | 6.81 | 6.42 | 5.90 | 3.78 | 5.42 |
| PbO | 0.54 | 0.03 | 0.19 | 0.00 | 1.12 | 2.48 |
| FeO | 0.04 | 0.00 | 0.01 | 0.25 | 0.05 | 0.26 |
| MnO | 0.06 | 0.07 | 0.04 | 0.15 | 0.16 | 0.41 |
| TiO_2 | 0.00 | 0.00 | 0.14 | 0.09 | 0.24 | 0.12 |
| ThO_2 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.21 | 0.26 | 0.00 |
| ZrO_2 | 0.00 | 0.96 | 0.00 | n.a. | n.a. | n.a. |
| TOTAL | 87.76 | 85.90 | 87.16 | 84.91 | 89.53 | 87.48 |

Tabl. II. — Analyses microsonde sélectionnées et partielles de microlite du sondage GPF (-401 m), d'un sondage minier (ES 20-4). Selected and partial microprobe analysis of microlite in the GPF drill hole, Beauvoir granite (-401 m) and mining drilling (ES 20-4).

Ohnenstetter et Piantone (ce volume). Le thorium n'est jamais détecté. Une zonalité des teneurs peut s'observer avec des cœurs généralement plus riches mais l'inverse peut s'observer (tableau II, 4 à 7). Les zones riches en uranium sont fortement métamictisées. Le long du sondage Kosakevitch et al. (ce volume) observent une décroissance des teneurs en uranium du microlite du faciès B 2 au sommet du faciès B 1. La décroissance des teneurs en uranium entre le cœur et la bordure des cristaux de microlite suggère que la diminution corrélative des teneurs en uranium dans le granite est un phénomène contemporain de la croissance de ces minéraux au sein du magma.

La columbite (100 à 800 μm) ne renferme par contre pas de teneurs en uranium détectables à la microsonde, bien qu'elle puisse être localement en syn croissance avec de l'uraninite (échantillon -98,38 m).

Le zircon présente généralement des teneurs en UO_2 variant de 0,7 à 2 % du poids dans les échantillons analysés. Cependant, des cristaux extrêmement riches en uranium (jusqu'à 11 % poids UO_2 , tabl. III, n° 1 et 2), totalement métamictes et entourés d'une bordure très altérée d'une vingtaine de μm dans le minéral hôte (topaze) (semblable au fossé de destruction présente autour des uraninites) ont été observés dans un

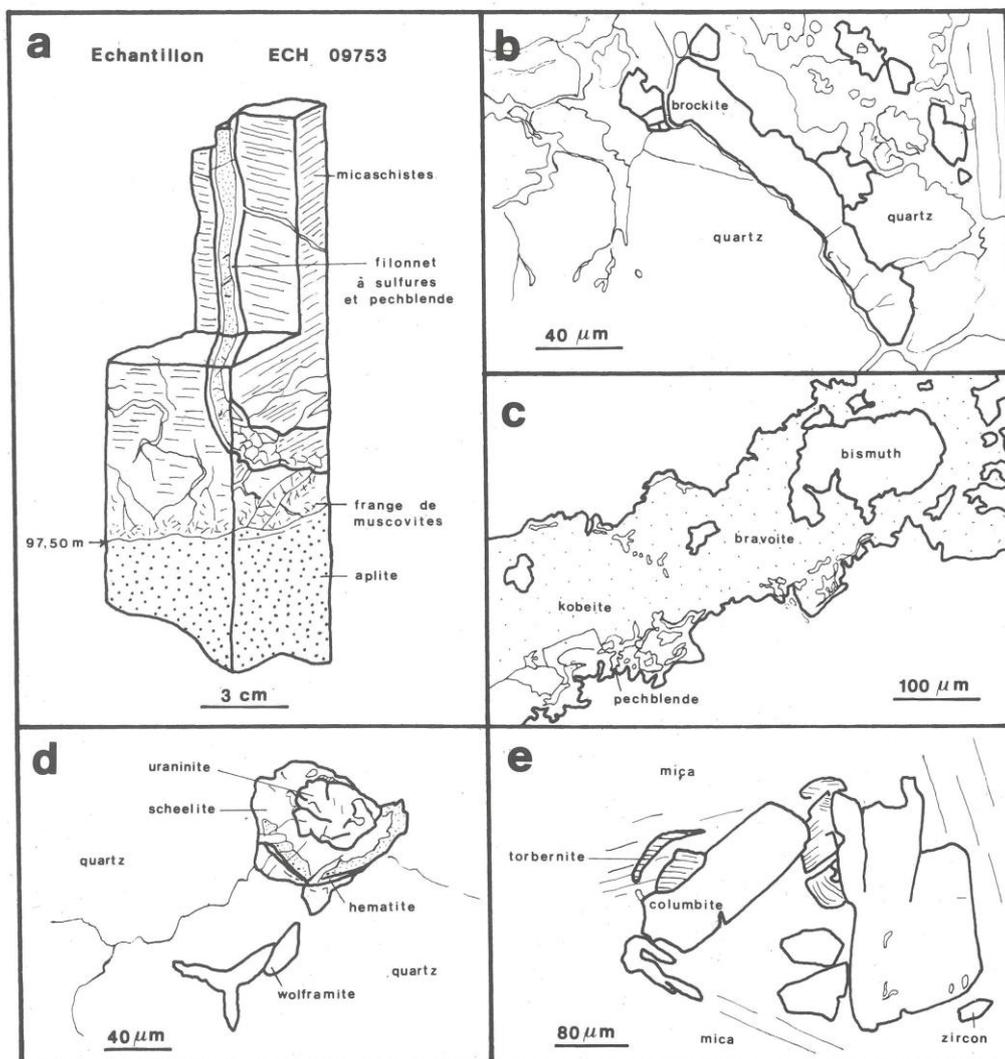


Fig. 1. — (a) filonnet à pechblende dans les schistes au toit du granite (— 97,53 m);

(b) brockite dans le sondage ES 58 (— 58 m);

(c) minéralisation à pechblende, uranotitanate riche en Nb et sulfures dans les micaschistes (— 872,6 m);

(d) uraninite en paragenèse avec scheelite et wolframite dans une aplitite (— 94,55 m);

(e) uraninite altérée en chalcopite, en syncoissance avec de la columbite (— 98,38 m).

(a) Pitchblende veinlet in the micaschists of roof of the Beauvoir granite (— 97,53 m);

(b) brockite in the ES 58 (— 58 m) drill hole;

(c) pitchblende, U-Ti mineral rich in Nb and sulfides vein in the micaschists (— 872,6 m);

(d) uraninite in association with scheelite and wolframite in an aplitite (— 94,55 m);

(e) uraninite altered in chalcopite, showing simultaneous growth with columbite (— 98,38 m).

échantillon à —287,6 m. Il peut s'agir d'inclusions inframicroscopiques d'uraninite dans le cristal de zircon plutôt que d'une réelle substitution, car les mesures ne sont pas reproductibles d'un cristal à l'autre dans une même lame mince. Cependant ces valeurs sont proches de celles de la solubilité maximale de U(IV) dans le zircon, mesurée expérimentalement par Zimmer (1984) à 830°C, 1 Kb et tampon Ni-NiO est de $7,5 \pm 1,5$ moles % $USiO_4$ (10,5 % poids UO_2).

Les seules phases thorifères observées sont la monazite et un minéral voisin de la brockite. Un cristal monazite a été identifié au MEB à partir de l'étude de concentrés de niobotantalates provenant de la carrière de Beauvoir. La localisation exacte n'étant toutefois pas connue, une pollution par le granite des Colettes affleurant dans la carrière ne peut être totalement exclue. La phase minérale de composition semblable à celle de la brockite : $(Ca, Th)PO_4 \cdot H_2O$ a par contre été

identifiée dans une lame mince du sondage 58 (échantillon S 58-58 fourni par L. Raimbault) et analysé à la microsonde (tabl. III). Ce minéral contient de 1 à quelques % de terres rares légères et d'uranium, ainsi que du plomb radiogénique. Il présente une forme allongée et des faces cristallines bien développées. Il est en position intergranulaire entre quartz et lépidolite (fig. 1b). Il est associé à un autre phosphate calcique mal cristallisé riche en terres rares. Il pourrait s'agir d'une monazite plus ou moins altérée. L'échantillon contenant cette phase thorifère ne présente pas de concentration en thorium (0,7 ppm) supérieure à la moyenne du granite de Beauvoir.

b) Les minéralisations uranifères dans les micaschistes

Des minéralisations uranifères ont été observées à deux niveaux (-97,53 m et -872,60 m) dans les micaschistes du

| | -287,6 m | | | -837,46 | S 58 (-58 m) | |
|--------------------------------|----------|-------|-------|---------|--------------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Ta ₂ O ₅ | 0.08 | 0.15 | 0.31 | 0.18 | 0.00 | 0.00 |
| Nb ₂ O ₅ | 0.23 | 0.38 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| UO ₂ | 8.97 | 10.73 | 0.71 | 1.85 | 1.58 | 0.73 |
| CaO | 0.46 | 0.11 | 0.20 | 0.97 | 12.88 | 12.46 |
| SiO ₂ | 30.05 | 31.58 | 35.16 | 29.99 | n.a. | n.a. |
| PbO | 0.82 | 0.34 | 0.00 | 0.05 | 0.95 | 0.52 |
| FeO | 0.40 | 0.05 | 0.00 | 0.97 | 0.00 | 0.11 |
| MnO | 0.65 | 0.38 | 0.16 | 0.78 | 0.65 | 0.15 |
| TiO ₂ | 0.25 | 0.04 | 0.22 | 0.11 | 0.00 | 0.25 |
| ThO ₂ | 0.00 | 0.08 | 0.00 | 0.00 | 53.79 | 54.56 |
| ZrO ₂ | 54.70 | 54.87 | 60.50 | 56.78 | n.a. | n.a. |
| Ce ₂ O ₃ | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | 0.37 | 1.75 |
| P | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | 26.17 | 26.10 |
| TOTAL | 96.63 | 98.72 | 97.27 | 91.68 | 96.45 | 98.06 |

Tabl. III. — Analyses microsonde de zircon (-287,6 et -837,46 m) et de la brockite (sondage minier S 58, -58 m) — n.a. = non analysé. Microprobe analysis of zircon (-287,6 and -837,46 m) and brockite (mining drilling S 58, -58 m). n.a. = not analysed.

| | -872,60 m | | | -872,60 m | | |
|--------------------------------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| UO ₂ | 80.91 | 81.65 | 83.06 | 52.10 | 52.16 | 48.11 |
| ThO ₂ | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| PbO | 2.43 | 2.67 | 2.55 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Nb ₂ O ₃ | 2.88 | 0.70 | 0.59 | 8.17 | 10.08 | 9.19 |
| ZrO ₂ | 0.05 | 0.03 | 0.27 | n.a. | n.a. | n.a. |
| SiO ₂ | 0.37 | 0.34 | 0.21 | n.a. | n.a. | n.a. |
| CaO | 1.51 | 1.46 | 1.70 | 0.74 | 1.68 | 1.19 |
| MnO | 1.52 | 1.51 | 1.23 | 0.66 | 0.71 | 0.35 |
| FeO | 0.35 | 0.27 | 0.42 | 1.08 | 1.55 | 2.08 |
| TiO ₂ | 1.01 | 1.29 | 0.87 | 27.43 | 33.22 | 28.78 |
| Ta ₂ O ₃ | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| TOTAL | 91.03 | 89.92 | 90.89 | 90.37 | 99.53 | 90.10 |
| Ages Ma | 196 | 214 | 200 | | | |

Tabl. IV. — Analyses microsonde sélectionnées de pechblende (1 à 3) et d'un urano-titanate riche en Nb (4 à 6). Selected microprobe analysis of pitchblende (1 to 3) and of a Nb-rich urano-titanate (4 to 6).

sondage GPF. Elles correspondent à des anomalies radiométriques bien marquées (7 à 12 fois le bruit de fond) dans le log γ du sondage.

A -97,53 m il s'agit d'un filonnet d'environ 8 mm de large, subvertical, perpendiculaire à la schistosité et au contact granite/micaschistes. Il vient se biseauter sur ce contact riche en lépidolite et cassitérite. Les épontes du filonnet sont riches en sulfures (chalcopryrite, pyrite, marcasite) associées à des sphérules de pechblende fortement altérées en chalcocite (Cu(UO₂)₂(PO₄)₂·8-12H₂O). Le cœur du filonnet est rempli par un quartz zoné (fig. 1 a).

A -872,60 m la minéralisation se localise au voisinage d'une injection de granite de Beauvoir riche en micas et en gros quartz globuleux. Les lits les plus radioactifs sont parallèles à la schistosité. Il s'agit d'une association de pechblende en petits sphérules associée à du mispickel, de la bravoïte (Fe, Ni, Co) S₂, du bismuth natif subautomorphe associé à la bravoïte ou isolé dans la schistosité (fig. 1c). De la fluorine violette se localise plutôt au centre de cette association. Un titanate d'uranium riche en niobium associé à du zircon a également été observé dans ces veines (tabl. IV, n° 4 à 6). La pechblende est altérée localement en coffinite. Cette pechblende se caractérise par des teneurs élevées en niobium (jusqu'à 2,9 % poids) reflétant la géochimie du milieu percolé par les solutions hydrothermales, c'est-à-dire la richesse en Nb du granite de Beauvoir. Le tantale par contre n'est pas mobilisé à ce stade. Les teneurs en plomb de la pechblende correspondent à un âge chimique de 126 à 214 Ma. Cette paragenèse associant U, Bi, Ni et Co rappelle celles décrites dans l'Erzgebirge (Harlass et Schutz, 1965) et observée pour la première fois dans le Massif central. Des minéraux d'uranium hexavalents non identifiés sont présents le long de fissures sécantes sur la schistosité et sur les rods de quartz synschisteux.

4. — Géochimie U et Th des granites

a) Le granite de Beauvoir

Le granite de Beauvoir prélevé dans le sondage GPF Échassières n° 1 présente des teneurs en thorium très faibles (0,1 à 1,7 ppm) par rapport à un granite moyen. Elles montrent toutefois globalement une décroissance depuis le faciès basal B3 jusqu'au faciès apical B1 (fig. 2 et 3). Cet enrichissement est parallèle à celui des éléments classiquement incompatibles (F, Li, Sn, Ta, Rb...). Si la décroissance des teneurs est relativement bien réglée dans le faciès B1, on peut toutefois remarquer une accélération notable de la croissance des teneurs en Th (0,9 à 1,7 ppm) dans les quelques dizaines de mètres au toit du granite de Beauvoir qui se parallélise particulièrement bien avec celles en tantale (fig. 2). De plus une discontinuité apparaît entre -288,5 et -221,4 m, elle est marquée par des variations désordonnées des concentrations. Les teneurs en Th sont également très irrégulières dans les faciès B2, B3 et les filons injectés dans les micaschistes de la base du sondage.

Les teneurs en uranium du granite de Beauvoir sont par contre élevées (7 à 19 ppm) par rapport à un granite moyen (3,5 à 4 ppm) et montrent globalement un comportement inverse à celui du thorium et des éléments incompatibles. Elles décroissent de la base à l'apex du corps granitique.

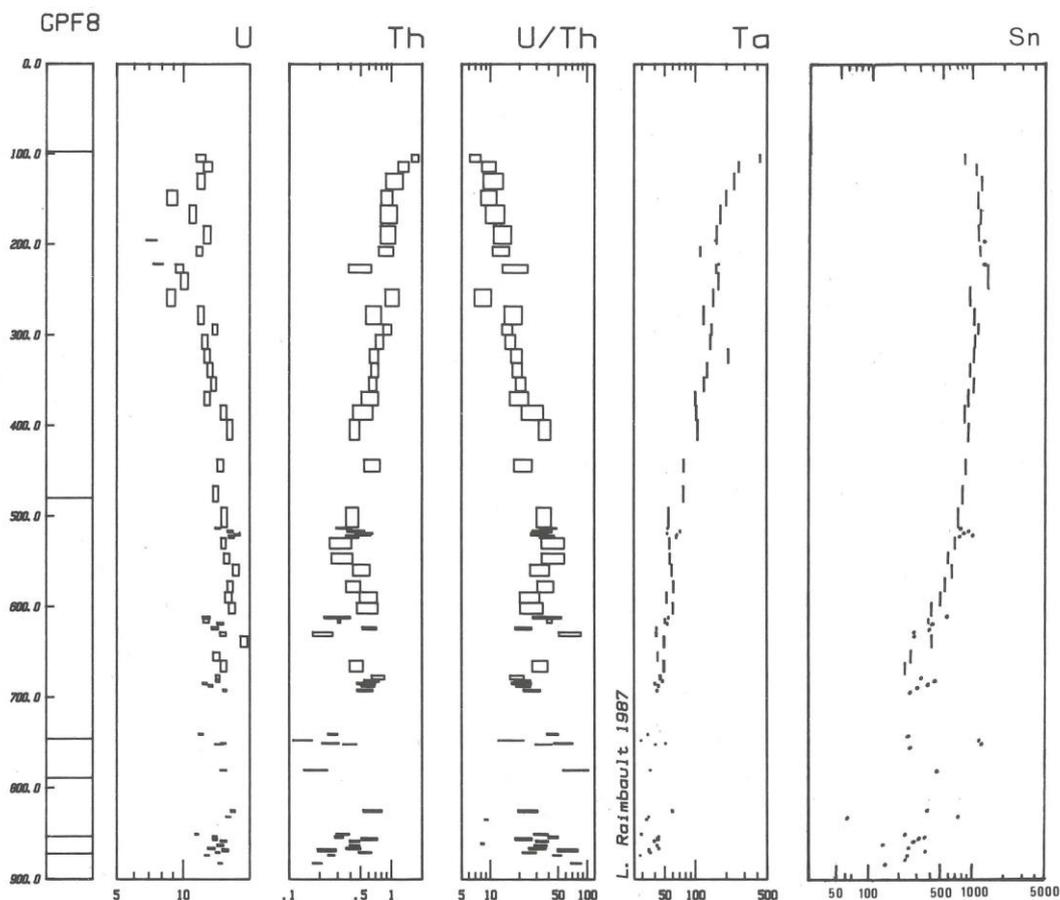


Fig. 2. — Log des concentrations en U, Th, Ta, Sn et des rapports U/Th dans le sondage GPF - Échassières n° 1. La dimension verticale des rectangles représente la longueur des passes prélevées dans le sondage, la dimension horizontale le domaine d'incertitude de la mesure (dessin L. Raimbault).

U, Th, Ta, Th/U, Sn logs of concentration in the Échassières n° 1, G.P.F. drill hole.

The vertical dimension of the box represents the length of the analysed cores. The horizontal dimension of the box represents the analytical error (drawing for U, Th, Ta, Th/U of L. Raimbault).

Quelques valeurs basses de UO_2 sont à mettre en relation avec des mobilisations hydrothermales locales (passées décimétriques).

- soit précoces, pour l'échantillon 68 (–195,9 m) marquées par un doublement des concentrations en Li_2O (3,08 % poids) et F (3,54 % poids) par rapport aux échantillons localisés de part et d'autre ; cette variation s'exprime sous forme d'une augmentation de la quantité de lépidolite ;
- soit plus tardives, échantillons 60 et 23 (–221,4 et –740,6 m) marquées par des valeurs élevées de la perte au feu (3 % poids) et correspondant à des argilisations.

L'échantillon 63, également pauvre en uranium (8,8 ppm) représente une passe beaucoup plus longue du sondage (–250 à –267 m), mais correspond en fait à une décroissance locale et importante de la teneur en uranium. Ceci est montré par l'échantillon métrique prélevé à

–260,2 m dans le premier échantillonnage réalisé pour le rapport d'exécution du forage (Document BRGM n° 100), présentant une teneur de 3,8 ppm U. Cet échantillon ne montre toutefois pas d'augmentation significative de sa perte au feu (1,6 % poids).

L'origine de la baisse de sa teneur en uranium ainsi que celle observée dans l'échantillon à 269 m n'a pu être expliquée. Des pertes importantes en uranium existent également dans ce premier échantillonnage au voisinage des deux grandes zones de fracture observées dans le sondage vers –730 et –460 m avec le développement d'altérations argileuses intenses. Il s'agit des échantillons localisés à –454 m (8,4 ppm U ; P.F. = 6,8 % poids) et à –728 m (3,0 ppm U, P.F. = 2,78 % poids), la perte en U moins importante à –454 m, malgré une perte au feu plus faible qu'à –728 m pourrait être due à la différence de site pour l'uranium dans ces 2 échantillons. A –454 m l'uranium est localisé essentiellement dans du microlite, beaucoup plus résistant à l'altération hydrother-

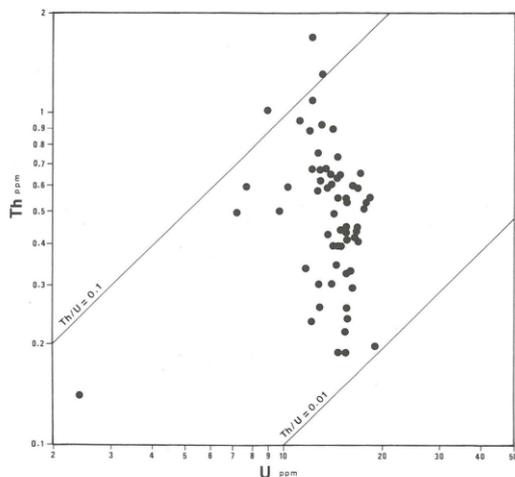


Fig. 3. — Diagramme Th-U pour le granite de Beauvoir prélevé dans le sondage GPF.

Th-U diagram for the Beauvoir granite of the GPF drill hole.

male que l'uraninite qui constitue le principal porteur d'uranium initial à -728 m (voir chapitre suivant). Le même raisonnement peut être appliqué aux échantillons 60 et 23 du sondage GPF.

Cette conclusion apparaît toutefois contradictoire avec ce qui est observé à partir des analyses réalisées sur les sondages miniers (fig. 3). Ces échantillons présentent tous un uranium principalement localisé dans le microlite, mais leur teneur en uranium peut être fortement abaissée jusqu'à 1,3 ppm. Cette contradiction peut être résolue si l'on considère que la perte en uranium de ces échantillons est récente et liée par exemple à l'altération supergène. En effet, la métamictisation des minéraux est un phénomène que nécessite un certain intervalle de temps pour que la désintégration radioactive conduise à une destruction importante de leur réseau et permette la libération de l'uranium. Par exemple, les thorites hercyniennes (Pagel, 1982) ou plus anciennes (Cuney, 1981) sont toujours des métamictes et montrent des pertes importantes en uranium. Par contre, les thorites alpines restent bien biréfringentes et ne présentent pas de pertes en uranium (Coucoulis, 1982). Le même raisonnement peut s'appliquer à la microlite. Lors des altérations hydrothermales argileuses anciennes observées dans le sondage GPF, l'uranium lié à la microlite non encore métamictisée n'a pas pu être mobilisé, tandis que l'altération supergène récente a pu mobiliser l'uranium des microlites métamictisées.

Cette mobilisation a pu entraîner des reconcentrations locales dans le granite de Beauvoir observées en particulier dans l'échantillon E10-87 (fig. 1) avec 32 ppm U et par la présence occasionnelle de chalcopite dans la carrière de Beauvoir. Des reconcentrations sont également observées dans des échantillons altérés du sondage (-817 à -819 m) présentant une perte au feu élevée ($2,6 \leq P.F. \leq 3,1$ % poids) avec des teneurs en uranium pouvant atteindre 25 ppm (Document BRGM n° 100) et par l'existence de plumbogummite à -221,30 m.

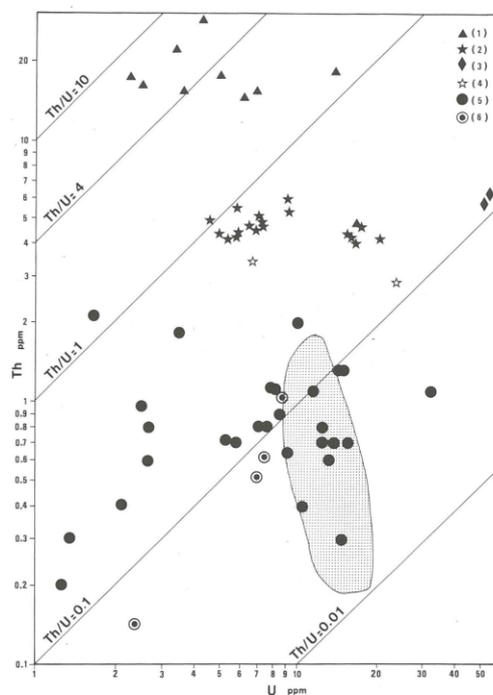


Fig. 4. — Diagramme Th-U pour les micaschistes (1), le granite des Colettes (2), les aplites (3), les microgranites (4), le granite de Beauvoir des sondages miniers peu profonds (5).

Le domaine en pointillés représente celui des données obtenues sur le granite de Beauvoir dans le sondage GPF. Les échantillons de ce sondage présentant des valeurs basses en uranium sont représentés par le symbole (6).

Th-U diagram for the micaschists (1), Colettes granite (2), aplites (3), microgranites (4) and the Beauvoir granite from short mining drill cores (5).

The dotted domain corresponds to the Beauvoir granite data of the GPF drill cores. The low uranium values observed in the GPF drill core are represented by (6).

b) Le granite des Colettes

L'échantillonnage a été réparti sur toute la surface affleurante du massif en sélectionnant les échantillons les plus sains et représentatifs des différents faciès (Raimbault et Ouin, 1984). Les teneurs en Th varient relativement peu (4 à 6 ppm) par rapport à d'autres leucogranites, 50 à 4 ppm par exemple dans le massif de Saint-Sylvestre (Friedrich et al., 1987), tandis que les teneurs en uranium présentent une variation importante (5 à 20 ppm). Dans les échantillons provenant de la surface, la majeure partie de cette variation est à mettre en relation avec l'altération supergène de l'uraninite, minéral contenant l'essentiel de cet élément dans ce type de granite (Friedrich et al., 1987).

c) Les autres faciès granitiques

Dans le sondage GPF deux autres types de faciès ont été rencontrés. Des aplites sont injectées plus ou moins parallèlement à la foliation des micaschistes du toit et de la base de la lame de granite de Beauvoir. Les deux échantillons analysés

(à -834 m, Document BRGM n° 100 et Rossi *et al.*, ce volume) montre des teneurs en uranium très élevées (52 à 58 ppm) et des teneurs en thorium (5,7 et 6,3 ppm) nettement supérieures à celles du granite de Beauvoir mais équivalente à celui des Colettes. D'une manière générale les aplites peuvent présenter des teneurs en uranium supérieures à celles des faciès granitiques qui leur sont associées mais leurs teneurs en thorium sont généralement nettement inférieures, parfois équivalentes (Pagel, 1981). Ces faciès aplitiques ne devraient donc pas être en filiation avec le granite de Beauvoir. Cependant, le thorium s'enrichissant parallèlement aux éléments incompatibles dans le granite de Beauvoir, les aplites pourraient représenter des liquides ultimes dans lesquels cet enrichissement ne serait accentué. Dans cette hypothèse les aplites devraient toutefois être situées au toit de l'intrusion ce qui n'est pas le cas pour celles qui ont été analysées. Elles peuvent dériver éventuellement du granite des Colettes mais plus vraisemblablement d'un autre massif granitique plus riche en thorium qui pourrait être le granite de la Bosse.

Des microgranites sont enclavés dans le granite de Beauvoir. Gagny et Jacquot (1985) ont proposé que leur mise en place soit synchrone du granite de Beauvoir, tandis que les filons observés en surface sont recoupés par le granite de Beauvoir et des Colettes (Aubert, 1969). Deux passées ont été analysées à -700 m (Document BRGM n° 100) et -860,30 m (Rossi *et al.*, ce volume) et présentent des teneurs en uranium élevées, respectivement 6,6 et 24 ppm, et de 3,4 et 2,9 ppm en thorium. Le premier échantillon a subi une altération argileuse et a donc probablement perdu de l'uranium. Le second par contre a pu être enrichi en cet élément par les fluides du granite de Beauvoir comme cela a été montré pour un certain nombre d'éléments (F, Li, Sn...) par

Monier *et al.*, ce volume. Du point de vue génétique les teneurs en thorium permettent seulement d'exclure une filiation directe des microgranites avec le granite de Beauvoir. D'après la géochimie des autres éléments en traces (Raimbault et Azencott, ce volume), ils présentent de fortes similitudes avec le faciès Croix Lambin des Colettes.

5. – Géochimie U et Th des micaschistes

Les micaschistes présentent des teneurs en thorium (6 à 29 ppm) en moyenne un peu plus élevées que celles estimées pour les shales moyens (12 ppm, Rogers et Adams, 1969). L'uranium présente des teneurs moyennes (2 à 6 ppm) dans les échantillons éloignés des contacts avec les faciès granitiques. Les teneurs en uranium s'accroissent fortement (jusqu'à 19 ppm) au voisinage des filons granitiques, aplitiques et au toit du granite. Les données analytiques de Piantone et Burnol (ce volume) montrent que cet enrichissement est accompagné d'une augmentation importante des teneurs en F, Li et Rb. Cette corrélation suggère que cet accroissement des teneurs en uranium est produit par les fluides magmatiques émis par le granite de Beauvoir lors de sa sursaturation.

6. – Étude des descendants de ^{238}U

^{238}U , ^{234}U et ^{230}Th ont été analysés dans 3 échantillons minéralisés du sondage GPF. Deux des minéralisations sont

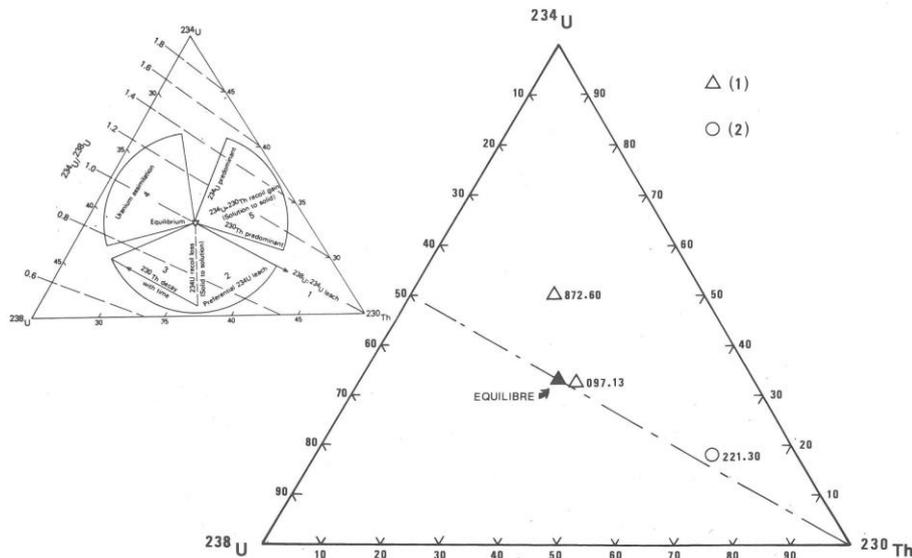


Fig. 5. — Diagramme ternaire des activités relatives de ^{238}U et de ses descendants ^{234}U et ^{230}Th .
En encart une partie du triangle est représentée avec une indication des différents types de processus pouvant affecter les équilibres isotopiques

(d'après Rosholt, 1983).
Ternary diagram with the relative ^{238}U , ^{234}U et ^{230}Th activities.
The inserted triangle represents the different processes leading to isotopic disequilibrium (from Rosholt, 1983).

à pechblende (−97,33 et −872,6 m) dans les micaschistes et le troisième est une plombogummite en placage sur les quartz enfumés automorphes d'une petite veine dans le granite de Beauvoir (−221,3 m).

Théoriquement dans un système clos les radio-isotopes issus de la désintégration de ^{238}U sont tous en équilibre en environ 1 Ma. Les dissolution et précipitation de ces minéraux par des fluides hydrothermaux ou météoriques récents produisent des perturbations de l'équilibre isotopique par lessivage sélectif de certains des descendants de l'uranium présentant des propriétés chimiques distinctes (Rosholt, 1983 ; Fleischer, 1980...).

L'échantillon −97,33 à pechblende plus ou moins altéré en chalcopite est pratiquement à l'équilibre. Il montre une légère perte en uranium marquée par des rapports $^{230}\text{Th}/\text{U}$ supérieurs à 1.

L'échantillon −872,6 est par contre nettement déséquilibré. Le rapport $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ est très inférieur à l'unité ce qui indique un apport important et récent d'uranium. Cet apport d'uranium correspond aux veines à minéraux d'uranium hexavalents localisées dans des fractures perpendiculaires à la schistosité. Cet uranium provient d'une oxydation ménagée d'une source d'uranium, car le rapport $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ est nettement supérieur à 1. Cette interprétation repose sur le fait que ^{234}U par effet de recul α au cours des réactions de désintégration est repoussé à la périphérie des minéraux uranifères. Une oxydation ménagée permet un lessivage sélectif de ^{234}U de la bordure des cristaux. Cette source de l'uranium est probablement l'uraninite du granite qui présente des évidences de corrosion.

L'échantillon 221,30 est également fortement déséquilibré mais montre un lessivage récent et important d'uranium marqué par des rapports $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ et $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ très nettement supérieurs à l'unité. Cet échantillon étant un minéral hexavalent d'uranium (plombogummite), il provient très probablement d'un premier lessivage simultané de l'uranium et du plomb radiogénique de l'uraninite du granite par des solutions capables de transporter simultanément ces deux éléments. Dans un deuxième temps d'autres solutions ont redissous une partie de l'uranium déposé en provoquant un enrichissement relatif en ^{230}Th beaucoup moins soluble que l'uranium.

Ces 3 échantillons permettent de mettre en évidence une mobilité récente et complexe de l'uranium et donc des circulations fluides récentes dans différentes parties du sondage jusqu'à ses parties les plus profondes.

Discussions et conclusions

Le granite albitique de Beauvoir à topaze lépidolite présente des caractéristiques géochimiques exceptionnelles par rapport aux leucogranites peralumineux. Il est extrêmement enrichi en certains éléments (F, Li, Sn, Ta, Nb, Be...) et des teneurs particulièrement faibles en d'autres (Th, Terres Rares, B), (Cuney *et al.*, 1986). La diminution des teneurs en uranium et la croissance des teneurs en thorium parallèlement à l'enrichissement en éléments incompatibles sont inverses à ce qui est observé dans les échantillonnages préservés de l'altération de leucogranites peralumineux de

caractère toutefois nettement moins évolué (Friedrich *et al.*, 1987).

Les faibles teneurs en thorium peuvent résulter soit d'un lessivage hydrothermal qui affecterait également les Terres Rares, soit à un fractionnement important des principaux porteurs de Terres Rares dans ce type de granite tels que les phosphates de type monazite et xénotime. Aucune corrélation n'est observée entre les teneurs en Th des échantillons et leur degré d'altération. La deuxième hypothèse apparaît donc plus vraisemblable et est supportée par les données expérimentales de Montel (1986). Ces données montrent la forte décroissance de la solubilité de la monazite avec l'accentuation du caractère peralumineux des magmas granitiques. Ce caractère peralumineux est particulièrement marqué dans le cas du granite de Beauvoir. Il peut donc expliquer le caractère très déprimé en Th et Terres Rares légères du granite de Beauvoir par un fractionnement important de la monazite au cours de la fusion ou de la différenciation ayant donné naissance au magma de type Beauvoir. L'enrichissement en thorium dans le granite de Beauvoir n'est pas accompagné d'un enrichissement en Terres Rares légères (Raimbault et Azencott, ce volume). Le comportement de ces éléments au cours de l'évolution du granite de Beauvoir est donc dissocié. La très grande richesse en F et Li de ce type de magma produit une forte dépolymérisation (Manning *et al.*, 1980) et peut conduire à une augmentation de la solubilité de certaines phases accessoires, comme de l'apatite (Ryerson et Hess, 1980).

La décroissance des teneurs en uranium au niveau de la roche totale et la diminution des teneurs en uranium dans la microlite parallèlement à l'enrichissement en éléments incompatibles est inverse à ce que l'on observe dans les échantillonnages sains de granite peralumineux riches en uranium c'est-à-dire à uraninite exprimée. Un tel comportement suggère une augmentation de $f\text{O}_2$ au cours de cette évolution. En effet l'uranium dans les magmas est présent sous 3 valences U(IV), U(V) et U(VI) dont les proportions dépendent de la $f\text{O}_2$ du magma (Calas, 1979). Si l'uranium est présent de manière dominante sous la valence (IV) l'uraninite peut cristalliser au stade magmatique. Par contre si la valence (VI) prédomine, l'uranium va pouvoir fractionner dans la phase fluide au moment de la sursaturation du magma (Cuney, 1980). Cette augmentation progressive de $f\text{O}_2$ vers la partie apicale du granite de Beauvoir est compatible avec plusieurs autres observations :

- le rapport $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ des lépidolites croît de la base au sommet du granite (Monier *et al.*, ce volume) ;
- les wolframites des micaschistes du toit présentent une apparition de Fe^{3+} dans leur structure parallèlement à une croissance du niobium interprété par Aïssa *et al.* (ce volume) comme une altération produite par les fluides magmatiques de Beauvoir, ce phénomène n'étant pas observé dans les wolframites des micaschistes de la base ;
- des enrichissements en uranium corrélés avec ceux en Li, F et Rb sont observés dans les micaschistes au contact avec les filons granitiques ou aplitiques injectés ;
- les études isotopiques (Fouillac *et al.*, ce volume) ont montré l'introduction, au stade magmatique, d'eaux météoriques dont l'influence décroît au mur de la lame.

Cette augmentation de $f\text{O}_2$ permet également d'expliquer le comportement de l'étain dans le granite de Beauvoir.

D'après les propriétés thermodynamiques des espèces de l'étain (Jackson et Helgeson, 1985) et les études expérimentales (Eugster et Wilson, 1985) la solubilité de cet élément dans les fluides aqueux augmente avec la décroissance de fO_2 . Il est remarquable de constater que les veines à cassitérite dans l'environnement du granite de Beauvoir, sont exceptionnelles malgré les teneurs extrêmement élevées en étain du granite et les concentrations élevées en chlorures des fluides démixés du magma. Ceci reflète directement la faiblesse du fractionnement de l'étain dans les phases fluides dans les conditions oxydantes ayant prévalu au moment de la sursaturation du magma à Beauvoir. La percolation de ces fluides dans l'environnement a toutefois conduit à un certain enrichissement diffus en étain dans les micaschistes et du granite des Colettes au voisinage de l'intrusion de Beauvoir. Ainsi malgré la fO_2 élevée une partie de l'étain a pu fractionner dans la phase fluide vraisemblablement du fait des concentrations élevées en chlorure des solutions. Ce phénomène peut expliquer la légère décroissance des teneurs en étain au toit de la coupole alors que le tantale peu mobile en phase fluide continue de s'accroître. Ainsi la potentialité métallogénique d'un ensemble magmatique n'est pas seulement conditionné par le caractère fortement incompatible des éléments métalliques au stade magmatique mais également et surtout par les conditions physico-chimiques leur permettant de fractionner dans les phases fluides.

Le comportement contrasté de l'uranium et de l'étain, au moment de l'équilibre magma-fluides dans le granite de Beauvoir est une illustration particulièrement claire des conclusions obtenues par Dubessy et al., (1987) sur le comportement opposé de ces deux éléments au stade hydrothermal.

A un stade probablement plus tardif des circulations fluides ont conduit à une reconcentration de l'uranium déposé de manière contemporaine avec des sulfures dans des fractures des micaschistes encaissants. Les sources de l'uranium les plus probables sont l'uraninite des faciès B2 et B3 et l'uranium des micaschistes provenant des fluides émis lors de la sursaturation du granite de Beauvoir. Le niobium présent dans la pechblende représente la signature du milieu source percolé par les fluides minéralisateurs.

Des circulations fluides récentes (≤ 1 Ma) sont mises en évidence par les déséquilibres importants observés entre les radioéléments de la chaîne de désintégration de ^{238}U , jusque dans la partie la plus profonde du sondage GPF.

Remerciements: Nous remercions D. Ohnenstetter et L. Raimbault pour la lecture critique de ce manuscrit.

Références bibliographiques

- AUBERT G. (1969) — Les coupoles granitiques de Montebrias et d'Échassières (Massif central français) et la genèse de leur minéralisation en Sn, Li, W et Be. *Mém. BRGM*, 46, 345 p.
- CALAS G. (1979) — Étude expérimentale du comportement de l'uranium dans les magmas, états d'oxydation et de coordinance. *Géochim. et Cosmochim. Acta*, 43, pp. 1521-1531.
- COUCOULIS A. (1982) — Les granitoïdes du massif de Vronidou - Sérès (Grèce). Typologie et évolution magmatique. Minéralogie et géochimie de l'uranium et du thorium. Thèse 3e cycle, INPL, Nancy, 179 p.
- CUNNEY M. (1980) — Preliminary results on the petrology and fluid inclusions of the Rössing uraniumiferous alaskites. *Trans. Géol. Soc. Afr.* 83, pp. 39-45.
- CUNNEY M. (1981) — Comportement de l'uranium et du thorium au cours du métamorphisme. Rôle de l'anatexis dans la genèse des magmas riches en radioéléments. Thèse d'État, INPL, Nancy, 520 p.
- CUNNEY M., AUTRAN A., BURNOL L., BROUAND M., DUDOIGNON P., FEYBESSE J.L., GAGNY C., JACQUOT T., KOSAKEVITCH A., MARTIN P., MEUNIER A., MONIER F. et TEGYEVY M. (1986) — Résultats préliminaires apportés par le sondage GPF sur la coupole de granite albitique à topaze-lépidolite de Beauvoir (MCF). *C.R. Acad. Sci. Paris*, 303, II, 7, pp. 569-574.
- CUNNEY M. et BROUAND M. (1985) — Étude minéralogique et géochimique de l'uranium et du thorium dans le sondage Échassières GPF 8. Rapport interne GPF déposé au BRGM, 10 p.
- DUBESSY J., RAMBOZ C., NGUYEN TRUNG C., CATHELINIEU M., CHAROY B., CUNNEY M., LEROY J., POTY B et WEISBROD A. (1987) — Physical and chemical controls (fO_2 , T, pH) of the opposite behaviour of U and Sn-W as exemplified by hydrothermal deposits in France Great Britain an solubility data. *Bull. Mineral.* 110, pp. 261-282.
- EUGSTER H.P. et WILSON G.A. (1985) — Transport and deposition of ore-forming elements in hydrothermal systems associated with granites: In: « High heat production (HHP) granites, hydrothermal circulation and ore genesis ». The Inst. Min. Metal., pp. 87-98.
- FLEISCHER R.L. (1980) — Isotopic disequilibrium of uranium: Alpha recoil damage and preferential solution effects. *Science*, 207, pp. 979-981.
- FRIEDRICH M.A., CUNNEY M. and POTY B. (1987) — Uranium geochemistry in peraluminous leucogranite. *Uranium*, 3, pp. 353-385.
- GAGNY C. et JACQUOT T. (1985) — Présentation de quelques problèmes mis en évidence par la pétrologie structurale. Forage profond Échassières n° 1 sur le granite de Beauvoir (Échassières, Allier). *Doc. BRGM n° 100*, pp. 139-163.
- HARLASS E. et SCHUTZEL H. (1965) — Zur paragenetischen Stellung der Uranpechblende in den hydrothermalen Lagerstätten des westlichen Erzgebirges. *Z. angew. Geol.* 11, pp. 521-524.
- HENOC J. et TONG M. (1978) — Automatisation de la microsonde. *Journ. Microsc. Spectrosc. Electron.* 3, pp. 247-254.
- JACKSON K.L. et HELGESON H.C. (1985) — Chemical and thermodynamic constraints on the hydrothermal transport and deposition of tin. I. Calculation of the Solubility of cassiterite at high pressures and temperatures. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 49, pp. 1-22.
- KOSAKEVITCH A. (1976) — Évolution de la minéralisation en Li, Ta et Nb dans la coupole granitique de Beauvoir (Massif d'Échassières, Allier). Rapport interne BRGM, n° 76, SGN 316 MGA, 82 p.
- MANNING D.A.C., HAMILTON D.L., HENDERSON C.M.B. and DEMPSEY M.J. (1980) — The probable occurrence of interstitial Al in hydrous, F-bearing and F-free aluminosilicate melts. *Contrib. Mineral. Petrol.* 75, pp. 257-262.
- MONTEL J.M. (1986) — Experimental determination of the solubility of Ce-monazite in SiO_2 - Al_2O_3 - K_2O - Na_2O melts at 800 °C, 2Kbar under water 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 INPL, Nancy, 566 p.

PAGEL M. (1982) — The mineralogy and geochemistry of uranium, thorium and rare earth elements in two radioactive granites of the Vosges, France. *Min. Mag.* **46**, 339, pp. 149-161.

RAIMBAULT L. et OUIIN M.C. (1984) — Géochimie du massif granitique d'Échassières (Allier). *Doc. BRGM* 81-8, pp. 109-119.

ROGERS J.J.W. et ADAMS J.A. (1969) — Uranium et thorium *In*: « Handbook of Geochemistry » K.H. Wedepohl Edit., Springer Verlag, II, 3, sections 90 et 92.

ROSHOLT J.N. (1983) - Isotopic composition of uranium and thorium in crystalline rocks *J.G.R.* **88**, B9, pp. 7 315-7 330.

RYERSON F.J. et HESS P.C. (1980) — The role of P_2O_5 in silicate melts. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **44**, pp. 611-624.

ZIMMER P. (1986) — Etude expérimentale à haute température et haute pression du système ternaire UO_2 - ThO_2 - SiO_2 en présence d'une phase fluide. Comparaison avec les systèmes ZrO_2 - ThO_2 - SiO_2 et UO_2 - ZrO_2 - SiO_2 . Implications géologiques. *Géol. Géochim. Uranium, Mém. Nancy*, **12**, 170 p.