

## Dossier "Radioactivité naturelle" - IX

### LA RADIOACTIVITE DES ROCHES (3)

Robert SIX

#### VI. ORIGINES DE LA RADIOACTIVITE DES ROCHES

Ce qui intéresse plus particulièrement le géologue ce sont les **teneurs moyennes** mesurées pour une « province pétrographique » déterminée, répondant à un faciès chimique, comme nous avons pu le constater pour les anomalies détectées dans notre pays.

Il est évident que l'étude approfondie d'un massif rocheux montre que la radioactivité n'est pas répartie de façon homogène mais présente des variations systématiques. Les analyses détaillées par plaques nucléaires ont permis d'établir **trois origines** de la radioactivité : les **inclusions**, les **fissures** et la **dispersion** dans les minéraux essentiels.

##### A. Inclusions

Un minéral peut contenir des **inclusions** qui peuvent être d'autres minéraux ou roches, un liquide, un gaz, ou tout corps englobé dans le minéral hôte (insecte dans l'ambre). On distingue **deux types** d'inclusions, selon le moment où elles apparaissent dans le minéral hôte :

1. les **inclusions primaires** qui apparaissent durant la phase hydrothermale de la cristallogénèse dans les fractures du minéral ;
2. les **inclusions secondaires** qui se forment après la cristallisation du minéral.

**Par exemple**, dans un granite composé des trois éléments habituels, biotite, quartz et feldspath, on peut constater que ceux-ci peuvent émettre un rayonnement  $\alpha$ . En fait ces éléments purs présentent une très faible activité propre. Une étude précise démontrera que les rayons  $\alpha$  sont émis par les inclusions qu'ils contiennent : zircon, apatite, uraninite, etc.

##### B. Fissures

Lorsque des **fissures** se forment dans la roche, lors d'une **phase de métamorphisme**, des **phénomènes hydrothermaux** se mettent en place. L'augmentation de la température et de la pression favorise la circulation d'eaux chaudes ou de vapeur au sein de la roche, capables de dissoudre de nombreux éléments et de provoquer leur migration vers les zones de vide formées par ces

fissures. La roche autour de ces dernières se déminéralise au profit des cristaux qui se forment dans les zones de vide.

La **nature des cristaux** dépend de la **composition de la roche** puisqu'elle en fournit les éléments. Elle dépend également de la **température** et de la **pression**, car la dissolution d'un élément répond à une combinaison caractéristique à cet élément du couple température - pression.

Le **remplissage** de ces fissures ou micro fractures peuvent présenter une **radioactivité plus élevée** que la roche elle-même, du fait que des éléments comme l'uranium, le thorium ou le potassium se retrouvent en inclusions dans les cristaux qui se forment dans ces cavités. On peut en tirer la conclusion que la radioactivité concentrée dans ces fissures ou ces interstices est d'origine postérieure à la formation de la roche.

### C. Dispersion dans les minéraux essentiels

Les **minéraux** dans lesquels entrent des éléments radioactifs peuvent être subdivisés en **minéraux essentiels** et **minéraux accessoires**. Les minéraux essentiels sont des constituants importants des roches. En plus de ces deux catégories, il faut ajouter les accumulations exceptionnelles ou **anomalies** que nous avons déjà rencontrées dans l'article précédent.

Comme nous l'avons déjà signalé, toutes les roches sont susceptibles d'être radioactives, du fait de la dissémination générale des trois radionucléides naturels, uranium, thorium et potassium. Toutefois, ils se fixent préférentiellement sur les sédiments fins, de sorte que ces derniers sont plus radioactifs que les sédiments plus grossiers.

Lorsque la radioactivité est répartie dans les minéraux essentiels, elle est contemporaine de la roche.

Le potassium entre dans la composition de nombreux minéraux essentiels. Les feldspaths potassiques et les micas en contiennent beaucoup. Généralement, l'uranium et le thorium, lorsqu'ils se trouvent en faible quantité, ne peuvent former de minéraux proprement dits et sont toujours associés à d'autres minéraux, plus particulièrement aux terres rares, au zirconium et au calcium.

Les principaux minéraux accessoires que l'on retrouve sous forme d'inclusions microscopiques dans les roches sont :

- les **zircons** ( $ZrSiO_4$ ), silicate de zirconium, du groupe des néosilicates. Les cristaux de zircon les plus anciens actuellement connus sur Terre ont été trouvés dans la **formation Narryer Gneiss Terrane du craton Yilgarn** en Australie occidentale, avec un âge estimé à **4,404 milliards d'années**. Ils sont relativement fréquents dans les **roches plutoniques de type granitoïde** (granites) et les **roches alcalines** (pegmatites ou syénites). On les retrouve également dans des **gneiss** et souvent en inclusions dans la biotite contenue dans ces roches. On peut parfois les trouver en abondance dans les syénites. Par contre, ils sont rares dans les laves et les tufs. Dans les roches métamorphiques, ils se présentent sous une forme recristallisée ou épitactique. Ils peuvent également se retrouver dans des sédiments en tant que matériaux détritiques.

**Épitaxie** (adj. **épitactique**) : L'épitaxie résulte de la croissance orientée d'un cristal sur un autre cristal appartenant à une espèce minérale différente.

Les zircons peuvent contenir, à l'état de traces, de l'uranium ou du thorium radioactif, par substitution d'atomes de Zr. La proportion  $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$  ou  $^{232}\text{Th}/^{208}\text{Pb}$  permet d'estimer l'âge du cristal et par déduction celui de la roche qui le contient.

Les zircons que l'on trouve dans la biotite sont généralement entourés d'un **halo pléochroïque**, cercle plus ou moins foncé ou opaque. Ce phénomène est dû à l'action du rayonnement  $\alpha$  émis par les impuretés radioactives du cristal qui détruisent la matrice de la biotite.

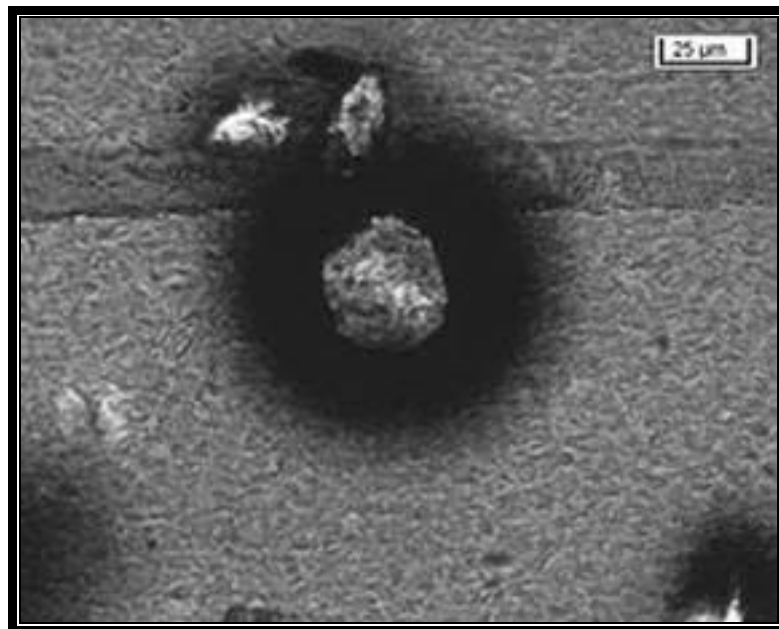


Fig. 1 - Un zircon dans une matrice de biotite, entouré d'un halo pléochroïque.

- les **sphènes**, ou **titanites** ( $\text{CaTi}(\text{SiO}_5)$ ), du groupe des nésosubsilicates sont caractéristiques des **roches magmatiques sodiques** (granites, syénites, trachytes, andésites) et **métamorphiques de faciès amphibolique** (gneiss, amphibolites, etc.). On les trouve en association avec des feldspaths, de la néphéline, de l'ægyrine, du zircon, de l'apatite.
- les **apatites**, phosphates de composition variable répondant à la formule générale  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{Cl},\text{F})$ . Ce sont des **minéraux secondaires** communs des **roches magmatiques alcalines** (granites, syénites, pegmatites, et laves équivalentes) et des **roches riches en Ca** (carbonatites, calcaires métamorphiques)
- les **allanites**, sous espèces des **épidotes**, contenant des terres rares (Ce, Th, Y...), rattachées au groupe des sorosilicates. Ce sont des **minéraux accessoires** de certains granites et pegmatites. La radioactivité des allanites

est très variable : inactives à quelques dixièmes de rayons  $\alpha/cm^2/s$ , soit une teneur en Th voisine de 1%, avec parfois un peu d'U.

- les **monazites**, nom générique de trois espèces de phosphates ( $Ce PO_4$  ou  $(Ce, La, Th)(PO_4)$ ). Ce sont des **minéraux accessoires** des granitoïdes à biotite, et de leurs pegmatites. Toutes les terres rares peuvent entrer dans la structure des monazites et leur capacité à accepter l'uranium et le thorium en fait les minéraux les plus radioactifs après l'uraninite ( $UO_2$ ), la thorianite ( $ThO_2$ ) et la thorite  $((Th, U) SiO_4)$ .
- les **xénotimes**, phosphates d'yttrium ( $YPO_4$ ) assez rares. Ils sont associés aux zircons dans des pegmatites riches en muscovite. On les trouve en faible quantité dans les **roches acides** comme les granites et les pegmatites et aussi en inclusions dans les biotites des granites. Ils sont également présents dans les **roches métamorphiques** et dans les dépôts de sédiments détritiques à la suite de la désagrégation des roches qui les contenaient.

Ces différents minéraux ne sont pas, à proprement parler, des minerais d'uranium ou de thorium. Ils contiennent ces éléments non pas comme constituants normaux, mais plutôt sous forme d'impuretés.

## VII. RADIOACTIVITE DES ROCHES MAGMATIQUES

### A. Teneur moyenne des éléments radioactifs des roches magmatiques

D'après les premiers auteurs (**HOLMES**) qui ont utilisé des méthodes radiométriques se basant sur l'émission de radon, les **teneurs moyennes** en **uranium** seraient de **9,10 ppm** pour les **roches acides** qui contiennent plus de **65%** de silice, et de **3,20 ppm** pour les **roches basiques**, contenant moins de **50%** de silice. Une autre méthode consiste à mesurer directement la radioactivité  $\gamma$  des descendants de l'uranium comme le  $^{214}Bi$  (bismuth). Il suffit de mesurer le niveau de rayonnement ambiant total au-dessus de la zone à prospector, au moyen d'un compteur gamma portatif ou embarqué à bord d'un véhicule ou d'un aéronef.

D'après des mesures obtenues par les nouvelles techniques décrites dans l'article précédent, ces chiffres semblent trop élevés.

Ainsi, pour des roches granitiques, les valeurs suivantes ont été avancées par différents chercheurs :

Auteurs	ppm d'U	ppm de Th
EVANS et GOODMAN (1941)	3,00	13
KEEVIL (1938)	2,77	7,94
SENTLE et KEEVIL (1947)	3,84 à 4,02	13,1 à 13,5

Ces données sont reprises d'un ouvrage paru **en 1957**. Il s'agit de « *La radioactivité des roches* » par **René COPPENS**, Maître de Conférences de Radiogéologie à la Faculté des Sciences de Nancy. Lui-même a analysé plus de 1.000 échantillons de roches acides (granites et granulites) de Bretagne par la méthode des plaques nucléaires. Il a mis en évidence une émission  $\alpha$  d'une

moyenne de  $0,80 \cdot 10^{-3} / \text{cm}^2 / \text{sec.}$ , ce qui pourrait correspondre à une teneur moyenne en uranium de **3,7 ppm** et une teneur moyenne de Th de **10,1 ppm**.

Une autre source, plus récente, donne, toujours d'après **HOLMES**, une teneur moyenne du granite en uranium de  $8 \cdot 10^{-6}$ . Ce qui permet de déduire, si l'on admet une densité de **2,70** pour le granite, que 1 m<sup>3</sup> de granite contient **21,6 g** d'uranium et 1 Km<sup>3</sup> en contient **21.600 t** (**POMEROL et FOUET, 1975**).

Dans le manuel « *Les minéraux, leurs gisements, leurs associations* », les auteurs (**P. BARIAND, F. CESBRON et J. GEFFROY**) avancent qu'il n'est pas aisé de séparer géochimiquement le comportement de ces deux éléments, tous deux lithophiles et que le clarke d'ensemble est de **2,7 g/t** pour l'U et de **9,6 g/t** pour le Th mais que ces deux éléments sont surtout concentrés dans les granites et les syénites : environ **3 g/t** pour U et **8 à 17 g/t** pour Th. Les teneurs sont plus faibles dans les basaltes (**1 g/t** pour U, **4 g/t** pour Th) et très faibles dans les péridotites (**1 ppm** de U, **4 ppm** de Th).

### a. Le cas des roches basiques

Comme le montre les résultats de **HOLMES**, **les roches basiques présentent un taux de radioactivité d'environ trois fois moindre que celui des roches acides**, soit en moyenne de **1 à 2 ppm** d'uranium et de **3 à 4 ppm** de thorium. Quant à la répartition de cette activité, elle se montre fort différente de celle des roches acides, et semble plutôt diluée dans la masse de manière particulièrement uniforme. On n'y distingue peu d'inclusions actives.

Les mesures d'activités faites sur un certain nombre de type de roches montrent une activité très basse pour les gabbros, moyenne pour les diorites et beaucoup plus élevée pour les roches acides.

On constate, sans toutefois, en tirer une relation, que **l'activité augmente avec la teneur en silice qui varie pour ces roches de 40 à 75%**.

Toutefois, sur la base de différentes mesures, des teneurs moyennes (ordre de grandeur) ont pu être estimées :

	ppm d'U	ppm de Th
Gabbros (moins de 50% de Si)	1	3
Roches intermédiaires : Diorites (moins de 60% de Si) Syénites, granodiorites (50 à 60% Si)	1,5 à 2	5 à 6
Roches acides (famille des granites) (65 à 70% Si)	3 à 4	9 à 12

### b. Le cas des roches volcaniques

Lors d'une éruption volcanique, les roches émises le sont sous forme de coulées de lave, de produits de projection, de nuages de cendres et de nuées ardentes.

D'une manière générale, on peut dire que les volcans « rouges » effusifs sont moins radioactifs que les volcans « gris » explosifs. Ainsi, les laves des volcans d'Hawaii, basaltiques, et leurs équivalents plutoniques (les gabbros) sont moins

radioactifs que les laves des volcans de la ceinture de feu du Pacifique (rhyolite) et leurs équivalents plutoniques (les granites).

Deux processus interviennent dans la formation des laves : d'une part, la **crystallisation** et la **différentiation magmatique**, et, d'autre part, les **coefficients de partage**.

### 1. Crystallisation et différenciation magmatique

Lors de sa remontée vers la surface, le magma subit une **crystallisation fractionnée** et une **différenciation**. Au départ, le magma primitif est généralement plus proche d'un basalte. Lorsqu'il commence sa cristallisation, il le fait de manière différentielle, c'est-à-dire que certains minéraux cristallisent (olivine, pyroxènes) en premier, appauvrissant la masse en Fe, Mg et l'enrichissant en Si, Al, Na, K. Si le processus de cristallisation se poursuit suffisamment longtemps, le magma basaltique du début devient plus granitique.

### 2. Coefficients de partage

On retrouve nos éléments radioactifs classiques ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$  et  $^{238}\text{U}$ ) également dans les roches volcaniques, mais à des teneurs variables selon leur nature : plus élevées dans les laves siliciques que dans les laves plus mafiques.

Dans le système basaltique, ces éléments sont dits « incompatibles », car pour des raisons cristallogénétiques, ils sont incapables de s'incorporer dans la structure des cristaux formés dans le magma basaltique (olivines, pyroxènes). Ils restent dans le magma résiduel jusqu'au moment où celui-ci atteint des compositions granitiques (rhyolitiques) et que la présence de feldspaths alcalins permet l'incorporation du K dans les nouveaux cristaux en formation.

Cet élément chimique se compose de trois isotopes : les isotopes  $^{39}\text{K}$  et  $^{41}\text{K}$  qui sont stables et représentent **99,99%** du potassium naturel, et le  $^{40}\text{K}$ , isotope radioactif dont la demi-vie est de **1,28 milliards d'années**.

Neuf fois sur dix, le  $^{40}_{19}\text{K}$  se désintègre par émission  $\alpha$  en  $^{40}_{20}\text{Ca}$  (calcium). La dixième fois il se transforme en  $^{40}_{18}\text{Ar}$  (argon) par capture électronique.

Tant que la lave est liquide, l'argon formé peut s'échapper, et comme il s'agit d'un gaz inerte, il ne peut se combiner chimiquement avec un constituant de la roche. Lorsque la lave se refroidit, il reste prisonnier de la roche et s'y accumule, permettant à un minéralogiste de déterminer l'âge de la roche à analyser par la **méthode K/Ar ou  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$**  déjà évoqué précédemment.

Le Th et l'U vont atteindre des valeurs proches de la saturation et vont « s'incruster » lors des dernières phases de cristallisation (apatites, zircons, monazites, allanites, etc.).

**Ce processus a pour conséquence, qu'au final, un granite / rhyolite est plus radioactif qu'un gabbro / basalte.**



## Le nuage de cendres volcaniques du volcan Eyjafjöll

Ce que peu de gens savent, c'est que le nuage de cendres volcaniques émis par le **volcan islandais Eyjafjöll** à la **fin du mois d'avril 2010** a rejeté dans l'atmosphère des **émissions radioactives**, comme tous les volcans d'ailleurs.

Selon les dires du scientifique **Hervé NIFENECKER**<sup>1</sup>, il s'agirait de près de **600 tonnes** d'uranium et **1.800 tonnes** de thorium. Pour avancer ces chiffres, il s'est basé sur les calculs de l'Institut de volcanologie islandais. D'après celui-ci, **80 millions de m<sup>3</sup>** de **tephra** correspondant à **200 millions de tonnes** ont été dispersés dans l'atmosphère durant les **72 premières heures** de l'éruption. En tenant compte d'une concentration moyenne de **3 g/t** d'uranium dans la croûte terrestre et d'environ **10 g/t** pour le thorium, **NIFENECKER** arrive aux nombres de tonnes d'uranium et de thorium cités plus haut, retrouvés dans le nuage de cendres.

**Tephra** : ensemble des matières solides et liquides, provenant du magma et des roches de la cheminée volcanique, entraînées par les gaz et éjectées avec eux lors des éruptions volcaniques.

Une autre source, l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire - France), avance des chiffres un peu moins élevés : **400 tonnes** d'uranium et **1.300 tonnes** de thorium, pour un rapport Th/U égal à **3,3** (**VIATELIC et al.** 2006).

L'activité spécifique de ces éléments s'élève à **12.300 Bq/g** pour l'<sup>238</sup>U et **4.100 Bq/s** pour le <sup>232</sup>Th. Afin de tenir compte des descendants émetteurs  $\alpha$ , avant le radon, on peut multiplier ces valeurs par **4** pour l'uranium, soit **49.200 Bq/s**, et par **3** pour le thorium, soit **12.300 Bq/s**.

**NIFENECKER** a voulu faire une comparaison de la toxicité du nuage volcanique avec celui de la catastrophe de Tchernobyl.

Rappelons que dans le cas de l'explosion de la centrale russe, les retombées les plus toxiques furent celles du <sup>137</sup>Cs (césium) et de l'<sup>131</sup>I (iode).

En utilisant les **facteurs de dose** de la CIPR (Commission Internationale de Protection contre les Radiations), il établit le tableau suivant pour les risques sanitaires :

	Ingestion adulte	Ingestion 1 an	Inhalation
<sup>137</sup> Cs (Tchernobyl)	7,8 x 10 <sup>8</sup>	5,76 x 10 <sup>8</sup>	2,76 x 10 <sup>8</sup>
Uranium (Islande)	5,9 x 10 <sup>6</sup>	1,0 x 10 <sup>7</sup>	3,8 x 10 <sup>8</sup>
Thorium (Islande)	6,1 x 10 <sup>6</sup>	1,2 x 10 <sup>7</sup>	4,0 x 10 <sup>8</sup>
Total (Islande)	1,2 x 10 <sup>7</sup>	2,2 x 10 <sup>7</sup>	7,8 x 10 <sup>8</sup>

**En conclusion, la radiotoxicité par inhalation des cendres de l'éruption serait supérieure à celle due aux retombées de <sup>137</sup>Cs de Tchernobyl, mais 20 à 50 fois moins radiotoxique à l'ingestion.**

<sup>1</sup> Ingénieur et docteur ès sciences, **Hervé NIFENECKER** est Président d'honneur du collectif Sauvons le Climat, qu'il a créé en 2004.

Les effets sanitaires des radiations sont évalués en Sieverts, grâce à des facteurs de doses calculés par la CIPR.

En réalité, il est difficile de mesurer les effets radioactifs des émissions volcaniques car d'autres sources naturelles de propagation existent. Ainsi, les vents de sable provenant du Sahara transportent aussi des quantités significatives d'uranium et de thorium.



Fig. 2 – Le nuage de cendres du Eyjafjöll

## B. RAPPORT THORIUM / URANIUM

Bien qu'on les trouve en proportions diverses dans toutes les roches, l'uranium et le thorium sont fréquemment associés. De nombreux auteurs ont remarqué que dans les roches magmatiques, le **rapport uranium/thorium** paraît constant et proche de **3** (COPPENS). Lorsque l'on se trouve en présence d'inclusions, le rapport Th/U peut être très variable, du fait que ces deux éléments n'y sont pas répartis également. Pour que la mesure ait un sens, il est impératif de disposer d'un échantillon suffisamment important. Ce rapport, estimé par différents auteurs a donné des valeurs très variables : **2,6, 1,7, 2,8, 2,5, 3,3, 4,5, 4,00** (COPPENS). La moyenne Th/U des mesures plus précises effectuées par SENFTLE et KEEVIL, sur des roches granitiques, se situe aux **environs de 3,4**. Pour des roches intermédiaires, toujours d'après ces mêmes auteurs, elle est légèrement plus élevée et se chiffre à **3,98**. Malgré ces fluctuations, il n'en est pas moins vrai que les roches contiennent une proportion de thorium en rapport avec celle de l'uranium. Ceci prouve que ces deux éléments ne se sont guère séparés durant la genèse de ces roches et qu'ils ont eu des chimies identiques durant cette période. Du fait qu'ils ont des valences <sup>4+</sup> identiques, stable pour Th et pouvant devenir <sup>6+</sup> pour U dans certaines conditions, il



est normal que leurs processus de cristallisation soient identiques pendant la formation des roches qui les contiennent..

Le thorium apparaît dans les trois grandes familles de radionucléides naturels. Il est l'un des descendants de l' $^{238}\text{U}$  sous sa forme  $^{230}\text{Th}$  d'une **période de 75.380 ans**. Il forme sa propre famille comme nous l'avons déjà vu plusieurs fois à partir du  $^{232}\text{Th}$  d'une **période de  $1,45.10^{10}$  an**. Dans le milieu naturel, il est toujours en équilibre avec ses descendants (équilibre séculaire), tout comme l' $^{238}\text{U}$ .

Dans les minéraux, un **état stationnaire** s'établit au long des chaînes de désintégration, que l'on appelle « **équilibre séculaire** ». L'abondance relative de chacun des isotopes intermédiaires dépend de leur période respective : plus la période est courte, moins l'élément est abondant. A l'équilibre séculaire, le nombre de désintégrations par seconde, ou « activité radioactive » est le même pour tous les radionucléides de la chaîne. L'ensemble des réactions dans les minéraux d'une roche se résume à la transmutation progressive des atomes de l'isotope de tête de chaîne, par exemple l' $^{238}\text{U}$ , en atomes de l'isotope stable final, le  $^{206}\text{Pb}$  dans ce cas. Le problème est analogue à celui que tout élève a dû résoudre en arithmétique : celui des baignoires et des robinets

Il peut arriver que l'équilibre séculaire soit rompu, notamment lorsqu'une réaction physico-chimique isole l'un des intermédiaires par rapport à ses ascendants ou descendants. Après quelque temps, l'équilibre se rétablit plus ou moins rapidement selon la période des isotopes considérés. Ces ruptures d'équilibre sont très importantes pour les études de chimie environnementale.

Ainsi, l'uranium et le thorium subissent une séparation importante, si le milieu devient nettement oxydant, car l'uranium passe de l'état  $\text{U}^{4+}$  à l'état  $\text{U}^{6+}$ , devenant très soluble, tandis que le thorium ne change pas et reste à l'état  $\text{Th}^{4+}$ . Dans ces conditions, ils possèdent des chimies différentes ; les composés de l' $\text{U}^{6+}$  se dissocient de ceux du  $\text{Th}^{4+}$ , par dissolution et se recristallisent séparément, formant des minéraux d'uranium sans thorium.

Les roches qui n'ont pas été oxydées auraient un **rapport Th/U entre 3 et 4**, tandis que celles qui ont subi une oxydation et un lessivage verraient leur **rapport Th/U nettement supérieur à 3**. Par contre, les roches sédimentaires afficheraient un rapport Th/U inférieur à cette valeur.

**On peut en tirer une hypothèse qui demande à être confirmée : le rapport Th/U permettrait de se faire une idée sur la formation des roches.**

Le processus d'équilibre séculaire a été mis à profit pour déterminer une méthode de datation : la **méthode thorium/uranium**. Celle-ci s'applique à des systèmes constitués par des minéraux accessoires riches en uranium et en thorium (monazites, zircons, minerais d'uranium et de thorium...). Elle est utilisée dans de nombreuses applications comme la datation des diverses concrétions calcaires, la détermination de l'âge des fossiles de mollusques ou celle des coraux, etc.

A titre d'exemple et de conclusion pour cet article, je donne les résultats d'analyses effectuées lors de l'expédition franco-italienne en Dankalie (Afar, Ethiopie) durant la campagne de **décembre 1967 à février 1968**.

Les concentrations en U, Th et K ont été déterminées par spectrométrie  $\gamma$  dans plus de 100 échantillons de roches volcaniques prélevées dans deux zones géographiquement distinctes :

1. la dépression danakile (chaîne de l'Erta Ale, massif Pierre Pruvost, Alyata, Afdera, Borawlu) ;
2. Hauts-plateaux éthiopiens (Adigrate – Axum).

Les valeurs obtenues donnent les teneurs suivantes :

Lieux	Roches	K	U	Th	Th/U
Erta-Ale	basaltes	0,5%	1,3 ppm	3,3 ppm	2,6
	Rhyolites alcalines	2,3%	4,1 ppm	15,2 ppm	3,7
Pierre Pruvost	acides	3,9%	3,6 ppm	13,5 ppm	3,8
Borawlu	rhyolites	2,8%	4,6 ppm	14,7 ppm	3,4
	basaltes	0,6%	0,9 ppm	3,1 ppm	
Hauts-plateaux	Trapps basaltiques Adigrate	0,6%	0,6 ppm	1,1 ppm	1,7
	Phonolites Axum	3,9%	2,7 ppm	14,9 ppm	4,9

## C. BIBLIOGRAPHIE

- ❖ **BARIAND P., CESBRON F., GEFROY J.** (1978) – *Les minéraux, leurs gisements, leurs associations*, T. 2, Minéraux et Fossiles.
- ❖ **COPPENS R.** (1957) - *La radioactivité des roches*, Presses Universitaires de France, coll. « *Que sais-je ?* », 741.
- ❖ **HAMELIN B.** – *L'environnement daté et chronométré*, in *Noyaux atomiques et radioactivité*, Dossier *Pour la Science*, oct. 1996.
- ❖ **POMEROL C., Fouet R.** (1975) – *Les roches éruptives*, Presses Universitaires de France, coll. « *Que sais-je ?* », 542.
- ❖ <http://www.springerlink.com/content/g7l0066516k20g4t/>