

GEOCHIMIE DES RADIOELEMENTS : U - Th - K₂O DANS LES ROCHES DETRITIQUES : UNE NOUVELLE METHODE D'INTERPRETATION ¹

par

Y. QUINIF ², J.M. CHARLET ² & Ch. DUPUIS ²

(8 figures & 5 tableaux)

RESUME.- L'utilisation d'une représentation Th/U - U/K₂O met en évidence une loi à laquelle obéissent la majorité des roches détritiques : $U/K_2O = a (Th/U)^b$. Les coefficients a et b sont spécifiques des faciès. La relation K₂O - Th, souvent linéaire, d'application moins générale, exprime une propriété géochimique de certaines argiles. L'utilisation de ces 2 équations conduit à un classement des roches détritiques selon la nature et l'origine de leurs minéraux (altérations continentales), le transport, le mode de dépôt, les conditions physico-chimiques de sédimentation. Cette méthode permet de comprendre les anomalies uranifères et constitue ainsi un cadre de traitement des mesures de spectrométrie gamma naturelle.

ABSTRACT.- The use of a Th/U - U/K₂O representation shows a law : $U/K_2O = a (Th/U)^b$ which is verified for the majority of detrital rocks. The coefficients a and b are specific of the facies. The relation K₂O - Th is often linear but is not general like the first. It express a geochemical property of some clays. The use of these two equations leads to a classification of detrital rocks according to the nature and origin of their minerals (continental alterations), their transport history, depositional characters and the physico-chemical conditions of sedimentation. This method permits to understand the anomalies of uranium and provides a framework for dealing with the measurements of natural gamma spectrometry.

I.- INTRODUCTION

Les trois radioéléments naturels majeurs : l'uranium (235 et 238), le thorium 232 et le potassium 40 sont tous lithophiles mais ont dans l'hydrosphère des comportements géochimiques très différents. Le thorium, insoluble sous sa seule valence 4, transite soit fixé dans le réseau de certains minéraux lourds, soit adsorbé sur les argiles (Langmuir & Herman, 1980). L'uranium, sous sa valence 4, se comporte d'une manière analogue au thorium mais, par contre, il peut devenir très soluble à l'état oxydé (U⁶⁺) ou sous forme de sels complexes principalement carbonatés (Grandstaff 1976 ; Langmuir, 1978 ; Giblin, Batts & Swaine, 1981). Le potassium très soluble sous forme de sels (KCl, K₂SO₄, . . .), est lié au réseau des silicates, notamment de certains minéraux argileux. De telles différences dans les comportements géochimiques permettent d'utiliser ces radioéléments comme traceurs de divers types de phénomènes marqueurs de certains faciès sédimentaires. Un pôle d'intérêt supplémentaire dé-

coule de l'importance prise au cours de ces dernières années par la recherche des gisements d'uranium en milieu sédimentaire.

L'analyse simultanée des trois radioéléments dans les roches est réalisable par spectrométrie gamme (Baleine, Charlet, Dupuis & Meys, 1976). Cette méthode, appliquée à l'étude de la géochimie de l'uranium dans les roches sédimentaires, nous a conduit à analyser un grand nombre de lithofaciès du Paléozoïque de l'Ardenne belge. Dans cette optique, les problèmes plus particuliers de deux contextes favorables à la concentration de l'uranium font actuellement l'objet de recherches au sein de notre équipe : les séries détritiques du Dévonien inférieur et les termes du passage Viséen-Namurien. En outre, l'incidence des processus géodynamiques externes sur la géochimie des radioéléments a été examinée en s'appuyant sur les caractè-

1 *Communication faite et manuscrit déposé le 5 octobre 1982.*

2 *Laboratoire de minéralogie. Faculté Polytechnique de Mons, rue de Houdain, 9 - B 7000 Mons.*

Tableau 1.- Les relations $\frac{U}{K_2O} = a \left(\frac{Th}{U}\right)^b$ et $Th = c (K_2O) + d$ pour différents faciès sédimentaires. (&)

Litho - faciès	$\left[\frac{U}{K_2O}\right] = a \left[\frac{Th}{U}\right]^b$ [A]				δ	$Th = c [K_2O] + d$ [B]		
	n	a	b	r ²		c	d	r ²
PALEOZOÏQUE								
Schistes noirs Rv* (massif de Stavelot)	10	3.47	-0.93	0.90	8.24	2.16	6.11	0.03
Phyllades siegé- niennes *	5	3.61	-0.95	0.998	8.53	3.37	1.18	0.81
Grès siegéniens *	7	9.54	-1.63	0.90	19.7	3.49	2.94	0.91
Schistes frasniens (Région de Rochefort)	7	2.32	-0.85	0.96	5.63	2.36	2.02	0.86
Schistes famen- niens (Condroz)	7	3.03	-0.92	0.97	7.21	3.54	-0.19	0.92
Passages								
Viseen-Namurien * Coupe de Haut-le- Wastia	12	11.5	-0.53	0.71	31.3	3.27	2.58	0.03
Coupe de Warnant	13	6.79	-0.73	0.92	17.1	5.54	-1.07	0.85
Coupe de Yvoir - Poilvache	26	8.85	-0.60	0.84	23.4	5.21	-1.56	0.91
Ensemble des schistes paléoz.	32	3.69	-1.07	0.95	8.46	1.60	6.65	0.30
TERTIAIRE								
Landénien (Belg.)	9	3.42	-0.81	0.85	8.40	4.31	-0.10	0.93
Yprésien (Belg.)	15	4.40	-1.04	0.98	10.2	3.96	0.45	0.96
Yprésien (5% > 50 μ) (Belg.)	8	4.63	-1.08	0.99	10.6	3.71	1.08	0.97
Rupélien (Belg.)	17	4.34	-1.03	0.93	10.0	3.73	1.24	0.67
Rupélien (5% > 50 μ) (Belg.)	9	5.52	-1.26	0.92	12.2	2.98	3.47	0.57
ensemble du Tert. belge	44	4.31	-1.03	0.94	9.98			
Tertiaire picard.	9	28.5	-1.90	0.94	56.9	2.65	5.56	0.69
QUATERNAIRE								
Dépôts karstiques (grottes d'Arbre et de Bohon-Ard.)	43	11.4	-1.65	0.87	23.5	1.36	8.18	0.12
Limons würmiens Harmignies	60	5.55	-0.96	0.82	13.1	6.13	-0.48	0.53
Mesnil - Esnard	61	6.59	-0.95	0.56	15.5	4.61	3.24	0.58

* = ensembles comprenant des anomalies uranifères

(&) $\delta = \sqrt{2a \exp(1/1 - b)}$ exprime la coordonnée du point d'intersection entre la courbe porteuse et la diagonale à l'origine.

res physiques et la minéralogie des argiles du Tertiaire et du Quaternaire. Disposant ainsi d'un grand nombre d'analyses pour une grande variété de roches (1), il devenait utile et possible de proposer divers modes de représentation des données permettant de discuter du comportement général des radioéléments dans les roches sédimentaires.

II.- LE DIAGRAMME Th/U - U/K₂O

Le contenu en radioéléments des roches peut être représenté dans le plan par un diagramme triangulaire (U-Th-K). L'intérêt indéniable de ce type de représentation (Charlet, Dupuis & Quinif, 1977) est altéré par l'existence de 2 variables indépendantes seulement, un des paramètres étant déterminé à partir des 2 autres par la relation $U(^{0}/o) + Th(^{0}/o) + K(^{0}/o) = 100$ ‰. En vue de dégager un autre type de représentation, nous nous sommes intéressés aux roches détritiques (clastiques), les roches d'origine chimique ou biochimique (calcaires, dolomies, phosphates) ne contenant généralement que de l'uranium (Quinif, Charlet, Dupuis, Robaszynski, 1981).

Le tableau 1 et la figure 1 montrent que les différents lithofaciés considérés se classent bien dans 2 espaces : Th/U - U/K₂O et K₂O - Th où les relations les mieux vérifiées sont respectivement :

$$\frac{U}{K_2O} = a \cdot \left(\frac{Th}{U}\right)^b \quad (1)$$

$$Th = c \cdot (K_2O) + d \quad (2)$$

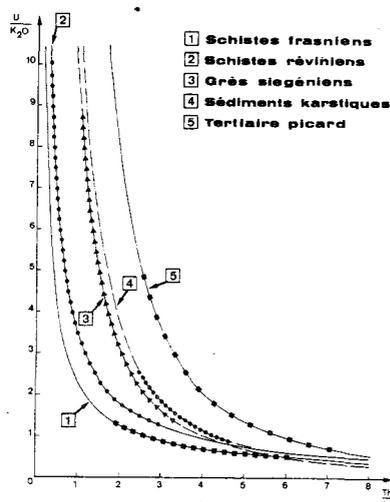
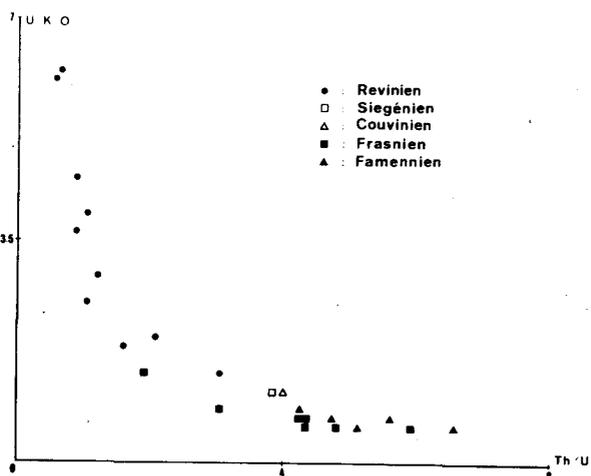
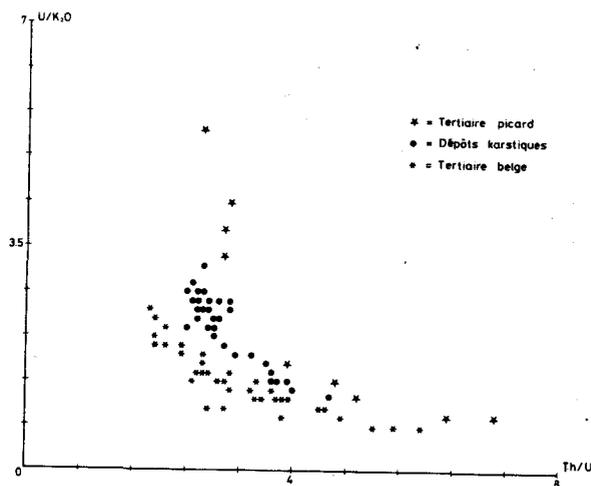
(1) Schistes du Revinien et du Salmien du massif de Stavelot, grès, schistes gréseux et phyllades du Siegenien, schistes divers du Couvinien, du Frasnien et du Famennien, calcaires du Dévonien moyen et du Carbonifère, schistes du passage Viséen-Namurien, craies phosphatées maastrichtiennes du bassin de Mons, argiles, silts et sables du Tertiaire belge et picard, limons éoliens et sédiments continentaux karstiques quaternaires. (Les analyses concernant les limons font partie d'une étude qui a été subventionnée par le FNRS).

Figure 1

a : Représentation T-U-K de diverses roches tertiaires et quaternaires.

b : Représentation T-U-K de diverses roches paléozoïques.

c : Diverses courbes porteuses T-U-L. Les surcharges sur les courbes visualisent les zones groupant les points expérimentaux.



La relation (1) possède un caractère général pour les lithofaciès étudiés, quelque soit l'âge et la nature du milieu (marin, lagunaire et continental), leur granulométrie ou leur évolution diagénétique (formations meubles ou consolidées). Remarquons que les faciès continentaux (dépôts karstiques, limons éoliens, . . .) obéissent toutefois moins bien à la relation (1), conséquence probable d'une plus grande diversité des mécanismes mis en jeu.

Nous appellerons "T-U-K" le mode de représentation que nous venons de définir et la loi en puissance qui le caractérise, les courbes sont appelées "courbes porteuses"; elles contiennent un ensemble d'informations sur la composition minéralogique du sédiment et l'origine de ses minéraux, le mode de sédimentation, les conditions physico-chimiques du milieu de sédimentation. Elles sont une certaine image d'un "faciès géochimique T-U-K".

III.- ANALYSE DE LA COURBE

$$U/K_2O = a \cdot (Th/U)^b$$

La courbe $U/K_2O = a \cdot (Th/U)^b$ est un hyperboloïde $y = a \cdot x^b$, asymptotique à l'infini pour $x = 0$. Elle est caractérisée par les valeurs a et b .

La signification physique du coefficient a peut être dégagée en remarquant que $U/K_2O = a$ si $Th/U = 1$. Ce coefficient exprime donc la manière dont varient l'uranium et le thorium par rapport au potassium. Plus a est grand, moins le potassium aura de "poids" par rapport à l'uranium. On comprend ainsi que les schistes, plus riches en potassium que les grès, soient caractérisés par des coefficients a plus petits que derniers.

La signification physique du coefficient b prend son sens lorsqu'on considère d'abord la valeur particulière $b = -1$. Dans ce cas, $Th = a \cdot (K_2O)$, l'uranium se comporte donc comme une variable indépendante des deux autres éléments. Le thorium et le potassium sont corrélés linéairement. Les argiles yprésiennes belges (avec moins de 5 % de refus au tamis de 50 μm) sont les roches qui se classent le mieux dans cette catégorie. D'une façon générale, les roches pélitiques marines obéissent à cette loi. Le rapport Th/K_2O apparaît comme une caractéristique du milieu à la fois par sa valeur mais aussi par ses variations au sein d'un ensemble ou d'une séquence détritique.

L'importance du rapport Th/K_2O justifie sa mise en évidence par une transformation algébrique de la relation (1).

$$U \cdot (K_2O)^{-1} = a \cdot Th^b \cdot U^{-b}$$

$$Th \cdot (K_2O)^{-1} = a \cdot Th^{b+1} \cdot U^{-(b+1)}$$

$$\frac{Th}{K_2O} = a \cdot \left(\frac{Th}{U}\right)^{b+1} \quad (3)$$

L'allure de la courbe dans l'espace $Th/U - Th/K_2O$ dépend fondamentalement de la valeur de b . On distingue 4 familles de courbes : I, II, IIIa, IIIb, exprimant chacune un "faciès géochimique T-U-K de base" (fig. 3).

Faciès I ($b = -1$). La courbe obtenue est une droite horizontale d'ordonnée a . C'est le faciès géochimique qui groupe les argiles yprésiennes (rapport Th/K_2O constant).

Faciès II ($b < -1$). Les courbes sont des hyperboloïdes à concavité dirigée vers le haut. On trouve notamment dans cette famille les grès, les sédiments détritiques fluviaux ou estuariens (dépôts d'origine karstique, Tertiaire picard).

Faciès IIIa ($0 > b > -1$, avec b voisin de -1). Cette courbe est proche de la courbe I sauf pour les valeurs Th/U plus petites que 0.3 où elle est très rapidement croissante à partir de l'origine. Elle est d'autant plus proche de l'horizontale que b est proche de -1 . Les schistes pré-carbonifères se rattachent à cette famille.

Faciès IIIb (b voisin de -0.5). La courbe est plus régulièrement et plus continûment croissante dans le cas IIIa. Seuls les échantillons des coupes du passage Viséen-Namurien appartiennent à ce faciès géochimique T-U-K. De plus, étant tous anormaux quant à leurs teneurs en uranium, ils restent concentrés sur le diagramme à de très faibles valeurs Th/U et nous n'avons pu encore contrôler la réalité de la courbe pour de plus fortes valeurs Th/U (fig. 3 et 7).

Pour une grande variété de lithofaciès étudiés, on constate que les coefficients a et b ne varient pas indépendamment l'un de l'autre mais suivant une relation (fig. 2) que nous appelons "courbe fondamentale" d'équation :

$$b = 3.78 a^{-1.03} - 2 \quad (r^2 = 0.96) \quad (4)$$

Toutefois, certains faciès continentaux (sédiments karstiques, limons), ou certains faciès anormaux en uranium ne répondent pas à cette loi, la diversité ou la complexité des processus mis en jeu étant trop grande.

IV.- ANALYSE DE LA COURBE

$$Th = c \cdot (K_2O) + d$$

La relation (2) qui introduit la liaison thorium-potassium apparaît moins bien vérifiée que la relation (1). Ceci peut apparaître assez étonnant lorsque b est voisin de -1. On sait en effet que dans ce cas particulier l'équation (1) exprime une relation univoque Th - K₂O (Th = a · K₂O). Un mauvais coefficient de corrélation pour la relation (2) ne semble donc pas compatible avec un bon coefficient pour la relation

(1) si b est voisin de -1. Ce paradoxe apparent est lié à la dispersion des points le long de la courbe porteuse. Si les teneurs en uranium varient dans un intervalle assez large, les points expérimentaux seront fortement dispersés le long de la courbe (1) (d'où un bon coefficient r² si la corrélation existe) alors qu'ils peuvent être concentrés sur un domaine limité du plan K₂O - Th pour des teneurs variant dans des limites très étroites (d'où un mauvais coefficient r²).

La droite Th = c (K₂O) + d peut être définie par son coefficient angulaire c et son ordonnée à l'origine d. Cette dernière caractérise la part de thorium qui n'est pas lié au potassium. Le tableau 2 montre par exemple qu'en ce qui concerne le Landénien, l'Yprésien ou les schistes du Fammenien, le thorium est associé au potassium (argiles, micas ou feldspaths potassiques). A l'opposé, la forte valeur de d pour les grès indique la part de thorium liée aux éléments détritiques grossiers (minéraux lourds).

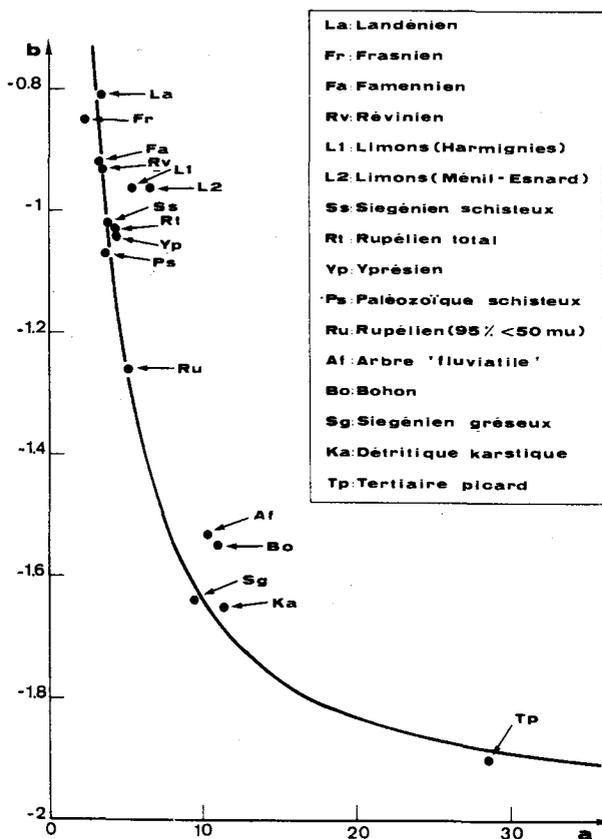


Figure 2

Diagramme exprimant les variations des deux coefficients a et b de la relation T-U-K. Les points représentatifs de divers faciès étudiés s'alignent sur une courbe en puissance d'équation : $b = 3.78xa^{-1.03} - 2$ avec un coefficient de corrélation $r^2 = 0.96$. Nous avons retiré de la régression les 4 faciès continentaux (L1 et L2 : limons éoliens, Af et Bo : détritique karstique) tout en gardant l'équation globale du détritique karstique (Ka). De même, les échantillons du passage viséennamurien, fortement anomaux, ne sont pas pris en compte.

V.- ANALYSE DE QUELQUES CAS PARTICULIERS

A) LES ARGILES TERTIAIRES BELGES

Une étude du Tertiaire belge a été menée sur 41 échantillons (Landénien, Yprésien, Bartonien, Rupélien) essentiellement détritiques et marins (argiles, silts, sables) (Mercier, Quinif & Dupuis, 1982). Dans cet ensemble, nous avons d'abord choisi 2 groupes-type :

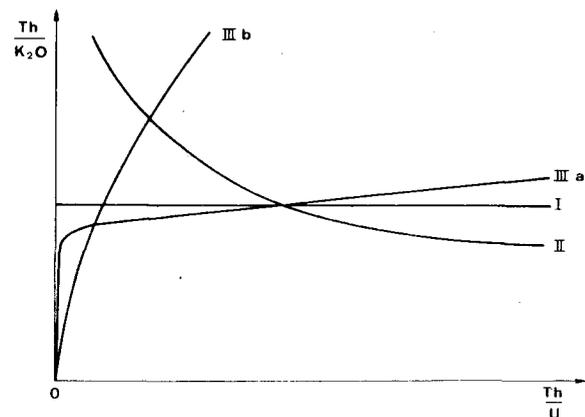


Figure 3

Allure des courbes porteuses dans le diagramme

$\frac{Th}{U} = \frac{Th}{K_2O}$. I, II, IIIa et IIIb constituent les types explicités dans le texte.

Yprésien et Rupélien dont les échantillons à plus de 5 % de refus au tamis de 50 μm ont été exclus. Il s'agit donc de roches essentiellement pélitiques, 8 de l'Yprésien et 9 du Rupélien (fig. 4). Le tableau 2 donne les différentes équations et quelques caractères géochimiques et minéralogiques.

Plusieurs remarques sont à mettre en exergue :

- Les coefficients de corrélation sont bons pour les équations (1) et (2) dans le cas de l'Yprésien alors que le Rupélien ne vérifie que l'équation (1). On voit ainsi qu'une mauvaise corrélation pour la relation (2) ne conduit pas nécessairement à une mauvaise corrélation pour l'équation (1).
- Dans le cas de l'Yprésien, les teneurs en uranium étant proches les unes des autres, l'étalement des points le long de courbe porteuse est une conséquence de la grande variation des teneurs en thorium et potassium. La situation est inverse dans l'exemple du Rupélien où l'étalement des points sur la courbe porteuse est une conséquence de la plus forte dispersion des valeurs en uranium, les teneurs en Th et K_2O étant relativement homogènes. Ces différences sont aussi exprimées dans l'équation (2) : le faible coefficient r^2 pour le Rupélien est dû à la concentration des points dans une zone peu étendue de l'espace $\text{K}_2\text{O} - \text{Th}$.
- La figure 4 montre clairement une séparation entre les points du Rupélien et ceux de l'Yprésien. Les premiers, à cause de leurs teneurs en uranium plus élevées, ont tendance à monter vers de plus fortes ordonnées : ils manifestent ainsi une tendance à l'anomalie uranifère. Ces différences trouvent leur explication dans la géochimie et la minéralogie des argiles. Le Rupélien constitue un milieu réducteur, favorable au piégeage de l'uranium : il y est 2 fois plus abondant que dans l'Yprésien. En outre, une corrélation entre l'uranium et la kaolinite dans le Rupélien suggère une préconcentration pédogénétique du métal. Enfin, une bonne corrélation entre le potassium et le thorium est une conséquence de la composition minéralogique des argiles et tire probablement son origine des phénomènes pédogénétiques du bassin versant.

La totalité des échantillons du Tertiaire belge fournit une équation T-U-K proche de celle de l'Yprésien, bien qu'avec un coefficient de corrélation plus faible. La comparaison des valeurs pour les coefficients a et b des diverses équations T-U-K du Tertiaire nous amène à définir un "faciès géochimique T-U-K de type pélite" avec un coefficient a compris entre 3 et 5.

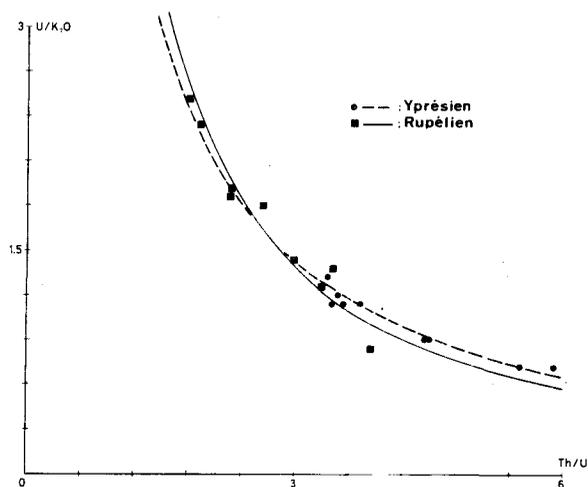


Figure 4

Représentation des argiles yprésiennes et rupéliennes (refus à 50 μm plus petit que 5 %) dans le diagramme T-U-K.

Tableau 2

Equations caractéristiques et données géochimiques et minéralogiques d'argiles yprésiennes et rupéliennes. M.R. : Matières réduites ; Kao : Kaolinite ; Smec : smectile ; $\langle \rangle$: valeur moyenne ; s : écart quadratique moyen.

a) Equations caractéristiques

	n	$\frac{U}{K_2O} = a \left(\frac{Th}{U} \right)^b$			$Th = c [K_2O] \cdot d$		
		a	b	r^2	c	d	r^2
Yprésien	8	4.63	-1.08	0.99	3.71	1.08	0.97
Rupélien	9	5.52	-1.26	0.92	2.98	3.47	0.57

b) Données géochimiques et minéralogiques

	$\langle U \rangle$	s	$\langle Th \rangle$	s	$\langle K_2O \rangle$	s	$\langle MR \rangle$	s	$\langle Kao \rangle$	s	$\langle Smec \rangle$	s
Yprésien	2.4	0.45	10.2	1.33	2.47	0.35	1.16	0.46	6	4.12	72	13
Rupélien	4.1	0.98	10.6	0.62	2.40	0.16	3.78	1.06	22	6.75	32	9

B) LE SIEGENIEN DE L'ARDENNE

Le Siegenien de l'Ardenne est démonstratif à 2 titres : il fait intervenir plusieurs lithologies et recèle des anomalies uranifères. La figure 5 explicite la distinction entre 2 familles d'échantillons : la courbe I groupe les schistes et les phyllades, la II les grès et les grès-schisteux. La distinction se justifie lorsqu'on calcule le coefficient de corrélation de l'ensemble des échantillons $r^2 = 0.75$ beaucoup moins bon que ceux calculés pour les 2 groupes pris séparément (tab. 4).

La courbe I appartient au faciès géochimique T-U-K de type pélite, la courbe II représente un faciès très différent que nous appellerons de type "grès". De plus, la répartition des échantillons sur la courbe II se fait suivant leur lithologie : on distingue un ensemble "grès purs" (IIa) et un ensemble "grès schisteux" (IIb). Le dernier s'aligne en effet préférentiellement sur la courbe de type grès et non sur celle de type pélite. Pour s'en convaincre, il suffit de calculer l'équation de leur courbe porteuse : $y = 8.3 x^{-1.55}$ avec un $r^2 = 0.97$, équation beaucoup plus proche de celle du faciès grès (tab. 3). Toutefois, une meilleure définition de ces divers ensembles exigerait une connaissance plus quantitative de la lithologie qu'une simple observation macroscopique.

C) LES SCHISTES PALEOZOIQUES PRE-CARBONIFERES

L'homogénéité de la lithologie confère une grande unité géochimique à cette famille. L'étalement des points le long de la courbe porteuse conduit à un bon coefficient de corrélation : $r^2 = 0.95$. En revanche, la forte concentration des points dans l'espace K₂O - Th donne un coefficient de corrélation non significatif. On voit à nouveau que les propriétés exprimées dans le diagramme T-U-K dépasse une simple conséquence de la corrélation linéaire entre le potassium et le thorium.

Des distinctions sont à faire dans cette grande famille (fig. 1c). Elles seront basées sur les valeurs prises par le coefficient a qui exprime, rappelons-le, le poids du potassium par rapport à l'uranium et au thorium (voir paragraphe 2). Comparés aux schistes et phyllades du Siegenien et du Révinien, les schistes du Dévonien supérieur se caractérisent par des valeurs plus faibles de a. Pour le Famennien, le rôle joué par le potassium est évident (faciès psammitiques et arkosiques), pour le Frasnien, il serait en relation avec une contamination par des produits d'origine cinéritique.

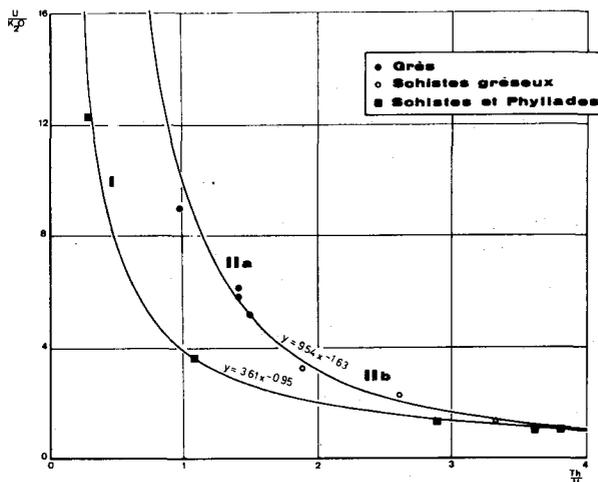


Figure 5

Diagramme T-U-K du Siegenien de l'Ardenne. La courbe I groupe les phyllades, la courbe II les grès (IIa) et les grès schisteux (IIb).

Tableau 3.- Equations caractéristiques du Siegenien

	n	$\frac{U}{K_2O} = a \left(\frac{Th}{U} \right)^b$			$Th = c [K_2O] \cdot d$		
		a	b	r ²	a	b	r ²
I. Schistes et phyllades	5	3.61	-0.95	0.998	3.37	1.18	0.81
II. Grès et grès schisteux	7	9.54	-1.63	0.990	3.49	2.94	0.91

Tableau 4

Equations caractéristiques des dépôts karstiques quaternaires.

	n	$\frac{U}{K_2O} = a \left(\frac{Th}{U} \right)^b$			$Th = c [K_2O] \cdot d$		
		a	b	r	a	b	r
Total	41	11.5	-1.57	0.90	1.36	8.18	0.12
Grotte de Bohon	13	11.0	-1.55	0.94	3.60	3.44	0.60
Grotte d'Arbre	28	7.50	-1.13	0.49	1.77	7.69	0.07
Fluviatile coupe d'Arbre	7	10.4	-1.53	0.94	1.59	7.2	0.08

D) LES DEPOTS KARSTIQUES (tableau 4, Quinif, 1978)

Ces dépôts continentaux doivent leur intérêt à l'action réceptrice et conservatrice du karst profond. Les échantillons étudiés proviennent de coupes situées dans 2 grottes belges : la grotte de la Vilaine Source à Profondville et la grotte de Bohon. Les faciès, meubles, vont des argiles aux sables grossiers. Le regroupement de la totalité des échantillons donne pour la relation 1 un coefficient de corrélation faible mais significatif :

0.90. Les résultats dont l'espace $\frac{U}{K_2O} - \frac{Th}{U}$ sont

pendant très différents pour ces deux grottes, tant au niveau des coefficients a et b que la valeur de la corrélation. Pour la grotte de la Vilaine Source, la valeur très faible du coefficient r^2 est le résultat d'une grande variabilité dans les apports et les caractères de la sédimentation (fluviale longitudinale, par infiltrations latérales, dépôts entrecoupés de phases érosives, de remaniements, . . .). Pour la grotte de Bohon, la bonne corrélation dans le diagramme T-U-K traduit une plus grande homogénéité dans les processus de mise en place du sédiment à partir d'une rivière souterraine. La diversité dans les processus détermine donc une grande dispersion des points dans la représentation T-U-K. Si, de la grotte de la Vilaine Source, nous ne considérons que les sédiments déposés en régime fluviale longitudinal (rivière souterraine), nous obtenons un r^2 de 0.94 et des coefficients proches de ceux de la courbe porteuse de Bohon qui regroupe des sédiments également déposés en régime fluviale longitudinal. L'influence des modes d'apports et de sédimentation sur les courbes porteuses est ainsi mise en évidence.

VI.- LES ANOMALIES EN URANIUM (2) ET L'UTILISATION DU DIAGRAMME Th/U - Th/K₂O

L'étude de la distribution des radioéléments dans les formations du passage Viséen-Namurien de la coupe de Blaton (Ciza, 1976 ; Charlet, Dupuis & Quinif, 1978) montre que les anomalies uranifères qui s'y développent ne sont finalement que des accidents locaux d'une tendance uranifère générale de la formation. Cette constatation est fondamentale pour la prospection de certains gisements en milieu sédimentaire. Elle montre que l'anomalie peut être annoncée par le comportement de l'uranium dans une lithologie déterminée, que l'on peut caractériser aussi grâce au comportement du thorium et du potassium (ce qui justifie la méthode T-U-K). On comprend ainsi l'intérêt de pouvoir dis-

cuter la position des anomalies dans les modes de représentation précédemment définis.

Dans le diagramme Th/U - U/K₂O, les anomalies se caractérisent par une fuite des points vers les grandes ordonnées (fig. 4 et 5). On remarque que l'apparition de l'anomalie prolonge la logique géochimique définie par la courbe porteuse : les points les plus anormaux des phyllades siegeniennes ou des schistes reviniens restent sur cette dernière.

Le diagramme Th/U - Th/K₂O a l'avantage de mieux distinguer l'influence du marqueur lithologique par le rapport Th/K₂O. Le diagramme de la figure 6 montre bien la distinction entre les différents faciès géochimiques. Il a l'intérêt d'expliciter la tendance géochimique des anomalies uranifères.

Suivant l'équation de la courbe porteuse (voir paragraphe 3 et figure 3), le comportement géochimique des anomalies est théoriquement très différent.

Faciès I : L'uranium est une variable indépendante du thorium et du potassium. Une anomalie se manifeste uniquement par l'accumulation des points vers l'abscisse Th/U = 0.

Faciès II : Quand le rapport Th/U diminue par accroissement des teneurs en uranium, l'ordonnée augmente. Une anomalie en uranium se caractérise donc également par l'accroissement des teneurs en thorium et (ou) la diminution des teneurs en potassium.

Faciès IIIa : La courbe est proche de la courbe I. Les points anormaux se regroupent vers l'origine. Ensuite, à de très faibles valeurs de l'abscisse, la théorie prévoit une convergence très rapide des points vers l'origine.

Faciès IIIb : Tous les points correspondant à une zone anormale se situent dans une région très proche de l'origine mais distincte de la partie rapidement croissante de la courbe IIIa.

Il ne nous est pas encore possible de présenter des exemples correspondant à chacun de ces cas de figure. Le Rupélien belge dont les teneurs en uranium sont nettement plus fortes que le clarke des argiles appartient au faciès I (fig. 6). Pour le faciès de type III, nous développerons le cas des schistes des séries du passage Viséen-Namurien, typiquement anormaux (tab. 2).

(2) La notion d'anomalie géochimique peut se concevoir de différentes façons. Ici, nous utilisons ce terme pour désigner des valeurs qui s'écartent du clarke de la lithologie considérée (Parker, 1967).

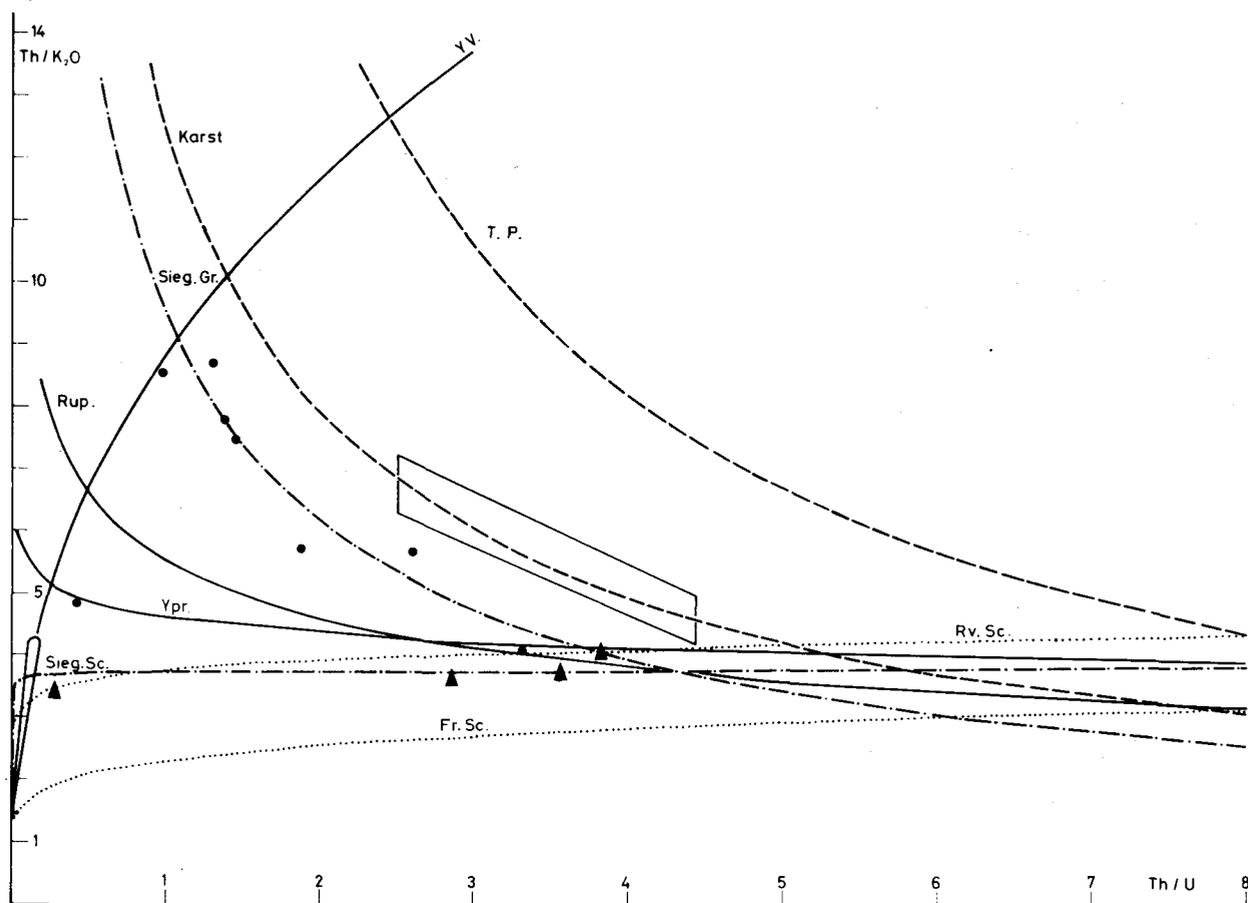


Figure 6.- Diagramme $\frac{Th}{U} - \frac{Th}{K_2O}$ montrant divers faciès géochimiques T-U-K : T.P. : Tertiaire picard, Karst : dépôts karstiques (grottes de Bohon et de la Vilaine Source à Arbre). Le cadre délimite la zone groupant les points expérimentaux. Sieg. Gr : grès siegeniens (les points sont représentés par un cercle noir), Rup : argiles rupéliennes dont moins de 5 % sont refusés à 50 μ m, Ypr : argiles yprésiennes dont moins de 5 % sont refusés à 50 μ m, Sieg. Sc : phyllades siegeniennes (les points sont représentés par un carré noir), Rv Sc : schistes reviniens, Fr. Sc : schistes frasniens. De plus, près de l'origine, nous avons figuré le "croissant anormalique" (voir fig. 8).

Il est intéressant de comprendre le comportement géochimique des trois radioéléments lorsque l'on passe de la zone anormalique aux faciès normaux. Ces études exigent un échantillonnage très large qui y doit de plus couvrir, si possible, une gamme complète de teneurs ; la seconde condition est souvent difficile à satisfaire car il existe fréquemment un gap préanormalique entre ce que nous appelons le "croissant anormalique" et la "zone normale" (fig. 8). Deux arguments permettent cependant de penser qu'à l'approche de l'anomalie, le comportement géochimique peut modifier l'équation de la courbe porteuse de type III.

Un premier argument peut être dégagé en examinant les résultats obtenus d'une part pour deux schistes

provenant d'un affleurement voisin de la coupe d'Yvoir (Namurien-Viséen) et appartenant au même ensemble litho-stratigraphique (tab. 5) et d'autre part pour une phyllade uranifère du Siegenien (fig. 7). Les trois échantillons se démarquent de leurs courbes porteuses respectives. Le calcul d'une courbe porteuse à partir de ces deux schistes namuriens donne l'équation suivante $U/K_2O = 4,53 (Th/U)^{-0,95}$ qui est typiquement de faciès IIIa alors que le "croissant anormalique" appartient à une courbe de type IIIb. La figure 8 décrit la situation qui semble prévaloir entre le "croissant anormalique" de type IIIb et la zone normale de type IIIa. Le phyllade Siegenien suit une évolution inverse ; il s'écarte de sa courbe porteuse de type IIIa pour se rapprocher du type IIIb.

Un second argument peut être avancé en examinant le système d'équations obtenu par traitement des résultats de la coupe "Yvoir-Poilvache".

$$\text{Th}/\text{K}_2\text{O} = 8.85 (\text{Th}/\text{U})^{0.4} \quad r^2 = 0,84 \quad (5)$$

$$\text{Th} = 5.21 (\text{K}_2\text{O}) - 1.56 \quad r^2 = 0,91 \quad (6)$$

Le coefficient d étant négatif, le rapport $\text{Th}/\text{K}_2\text{O}$ doit rester inférieur à 5.21 pour exclure les valeurs négatives de K_2O . Cette condition limite les ordonnées de la courbe porteuse (5) à des valeurs égales à 5.21. En conséquence, celle-ci ne peut adopter la forme convexe de type IIIb qui caractérise le croissant anomalique des schistes namuriens.

L'approche de l'anomalie se manifeste donc par une profonde modification du faciès géochimique.

VII.- CONCLUSION

Le classement des roches d'après leurs teneurs en uranium, thorium, potassium, suivant la représentation T-U-K permet de définir des "FACIES GEOCHIMIQUES" groupant des échantillons ayant en commun la nature et l'origine de leurs minéraux, le mode de

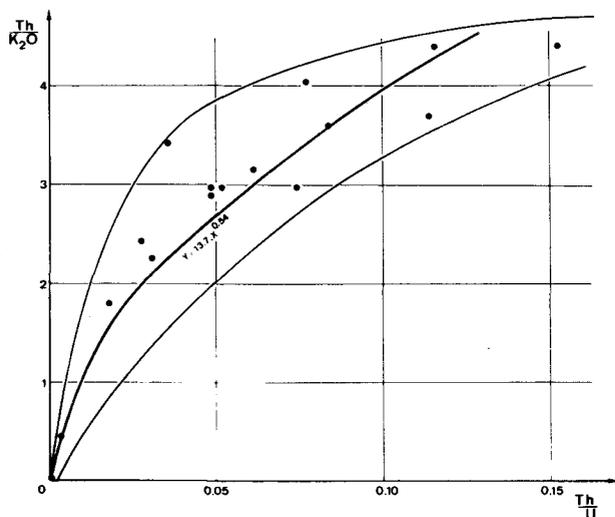


Figure 7

Diagramme $\frac{\text{Th}}{\text{U}} - \frac{\text{Th}}{\text{K}_2\text{O}}$ pour les schistes de la coupe

YV1 du passage Viséen-Namurien. Nous avons défini le "croissant anomalique" par deux courbes enveloppes ainsi que l'équation de la courbe porteuse.

dépôts, les conditions physico-chimiques de sédimentation. Les faciès sont définis par leurs COURBES PORTEUSES d'équation $\text{U}/\text{K}_2\text{O} = a \cdot (\text{Th}/\text{U})^b$; les coefficients a et b sont typiques du faciès considéré.

Le faciès géochimique I, de type pélite, joue un rôle central; il est caractérisé par des valeurs approxi-

Tableau 5

Teneurs en U-Th-K₂O de 2 schistes "intermédiaires" de la coupe YV1 de passage Viséen-Namurien.

Echantillons	U	Th	K ₂ O	Th/U
YV 1 II a	14	9.8	2.20	0.70
YV 1 II b	10.8	6.4	1.45	0.59

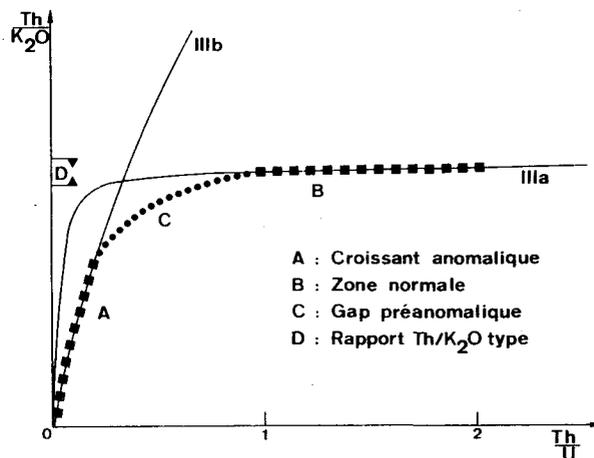


Figure 8

Allure des courbes porteuses de type III dans le cas d'une anomalie uranifère. Le rapport $\frac{\text{Th}}{\text{K}_2\text{O}}$ (D) est

typique de la formation pélitique considérée dont les points représentatifs s'alignent le long de la courbe IIIa (zone B). Les points anomaliques, au lieu de suivre cette courbe aux petites abscisses, se distribuent le long d'une courbe de type IIIb sous forme d'un "croissant anomalique". Les zones A et B sont séparées par un "gap préanomalique" pour lequel nous ne possédons que quelques rares points, zone n'obéissant pas aux équations de IIIa ou IIIb.

matives $a = 4.3$, $b = -1$, $\delta = 10$ (3). La courbe porteuse est une hyperbole, ce qui exprime une corrélation linéaire entre le potassium et le thorium, l'uranium devenant ainsi une variable indépendante de ces derniers. Les grès, les sédiments continentaux fluviaux, deltaïques constituent le faciès de type II, pour lequel le coefficient δ est supérieur à 10, b étant de l'ordre de -1.5 à -2 . Les schistes "normaux", ou ne présentant qu'une faible anomalie en uranium appartiennent au faciès IIIa, proche du faciès I. Enfin, les schistes du passage Viséen-Namurien forment le faciès IIIb, qui n'est connu que pour de très faibles valeurs du rapport Th/U (inférieur à 0.2).

La relation entre le potassium et le thorium joue aussi un rôle important. Elle est fréquemment linéaire, exprimant une propriété géochimique de certains types d'argiles, ou de la fraction argileuse d'une roche à granulométrie plus grossière. Le rapport Th/K₂O devient ainsi une grandeur fondamentale qu'il est commode d'exprimer en transformant algébriquement l'équation T-U-K : $\text{Th}/\text{K}_2\text{O} = a (\text{Th}/\text{U})^{b+1}$. Sous cette forme, les différents faciès s'expriment de manière très différente et, surtout, ce type de représentation permet d'étudier le comportement des roches lors du passage à des anomalies uranifères.

Notre approche permet une classification radio-géochimique simple des roches de nature détritiques. Elle fournit un outil d'étude des anomalies uranifères stratiformes (4). Par ailleurs, elle constitue un cadre de traitement des mesures de spectrométrie gamma naturelle, notamment issues de prospections (aéroportée ou autoportée) et de diagraphies conduisant à une interprétation des données en termes de faciès géochimiques attribuables à tel ou tel ensemble sédimentaire connu régionalement.

(3) On peut parfois remplacer les valeurs a et b par le paramètre

$$\delta = \sqrt{2} a \exp \frac{1}{1-b} \text{ exprimant la coordonnée du point}$$

d'intersection entre la courbe porteuse et la diagonale à l'origine.

(4) Le problème des lessivages, plus ou moins récents, de l'uranium doit bien sûr être pris en considération, notamment par l'étude de l'état d'équilibre à l'intérieur de la famille radioactive de l'uranium.

BIBLIOGRAPHIE

- BALEINE, O., CHARLET, J.M., DUPUIS, Ch. & MEYS, H., 1976. Dosage par spectrométrie gamma des radioéléments naturels, application à l'étude de quelques formations du Bassin de Mons.
- CHARLET, J.M., DUPUIS, C. & QUINIF, Y., 1977. Perspectives de la prospection de l'uranium à l'échelle nationale. *Ann. Mines de Belgique*, 5 : 521-531.
- CHARLET, J.M., DUPUIS, C. & QUINIF, Y., 1978. Mises en évidence par la thermoluminescence (TL) des sables landéniens d'anomalies radiométriques nouvelles dans la coupe du canal de Blaton. *Ann. Soc. géol. Belg.*, 101 : 337-349.
- CIZA, V., 1976. Contribution à l'optimisation de l'étude par spectrométrie gamma d'une anomalie radioactive T.F.E., Faculté Polytechnique de Mons, 58 pp.
- GIBLIN, A.M., BATTIS, B.D. & SWAINE, D.J., 1981. Laboratory simulation studies of uranium mobility in natural waters. *Geochim. Cosmochim. acta*, 45 : 699-709.
- GRANDSTAFF, D.E., 1976. A kinetic study of the dissolution of uraninite. *Econ. Geol.*, 71 (8) : 1493-1506.
- LANGMUIR, D., 1978. Uranium solution - mineral equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits. *Geochim. Cosmochim. acta*, 42 : 547-569.
- LANGMUIR, D. & HERMAN, J.S., 1980. The mobility of thorium in natural waters at low temperatures. *Geochim. Cosmochim. acta*, 44 : 1753-1764.
- MERCIER, M., QUINIF, Y. & DUPUIS, C., 1982. Minéraux argileux et géochimie des radioéléments (U-Th-K) du Tertiaire belge (sondage de Mol). R.A.S.T., p. 432, Paris.
- PARKER, R.L., 1967. Composition of the Earth's crust. *Geol. Survey. Prof. Paper* 440-D.
- QUINIF, Y., 1978. Les radioéléments naturels dans les dépôts détritiques de grottes - Premiers résultats. Actes du 6ème Congrès National de Spéléologie (Suisse). Suppl. 10 à *Stalactite* : 139-146.
- QUINIF, Y., CHARLET, J.M., DUPUIS, C. & ROBASZYNSKI, F., 1981. Relations uranium-phosphate dans les craies phosphatées des Bassins de Mons et de Picardie. *C.R.A.S.*, 293, 12 (11) : 914-917.