

Spectrométrie gamma et géologie appliquée

Jean-Marie CHARLET, Christian DUPUIS, Henry MEYS *

RESUME

Après un bref rappel de l'utilisation des compteurs de rayonnement en prospection et les progrès réalisés par l'introduction des scintillateurs, l'intérêt de la spectrométrie gamma en géologie appliquée est souligné :

- dosage simultané des radioéléments U-Th-K en laboratoire ou sur le terrain ;
- étude du déséquilibre U-Ra dans les processus géochimiques de lessivage ou de précipitation.

Deux exemples typiques illustrent ces considérations :

- recherche des anomalies en uranium dans les roches granitiques ;
- caractérisation des séries sédimentaires en sondages.

Le problème du choix des détecteurs est ensuite abordé : sondes à scintillation ou détecteurs semi-conducteurs. Les qualités des sondes à scintillations sont discutées dans le cadre de l'interaction des gammas avec le détecteur. Leur choix en fonction du rendement de comptage, du prix et de l'encombrement du dispositif est envisagé. Les avantages et inconvénients que présentent dans l'état actuel de la technique les semi-conducteurs sont analysés. La mise au point de nouveaux détecteurs est enfin évoquée.

On passe ensuite aux domaines d'application de la spectrométrie gamma : mesure en laboratoire sur poudre et carottes, prospection aéroportée, océanographie et prospection en mer (cartographie rapide, études hydrodynamiques et sédimentologiques, pollution et aménagement du littoral...), études en sondages (diagraphie naturelle, recherche des métaux par activation neutronique).

SAMENVATTING

Na het in herinnering brengen van het gebruik van stralingstellers bij de prospectie en de verwezenlijkte vooruitgang door de invoering van scintillatoren, wordt het belang van de gammaspectrometrie in de toegepaste geologie onderstreept :

- gelijktijdige gehaltebepaling van de radio-elementen U-Th-K in het laboratorium of in het veld ;
- studie van de wanverhouding U-Ra in de geochemische uitloog- of precipitatieprocessen.

Twee typische voorbeelden illustreren deze beschouwingen :

- opsporen van uraniumafwijkingen in granietgesteenten ;
- kenschetsing van de sedimentaire reeksen in de boringen.

Daarna wordt het probleem van de detectorkeuze aangevat : scintillatievoeler of halfgeleidende detectoren. De goede eigenschappen van de scintillatievoelers worden besproken in het kader van de gamma-interactie met de detector. De keuze ervan is gepland naar gelang van het telrendement, de prijs en de omvang van de inrichting. De voor- en nadelen van de halfgeleiders in de huidige stand van de techniek worden geanalyseerd. Ten slotte wordt de uitwerking van nieuwe detectoren aangehaald.

Daarna gaat men over naar de toepassingsdomeinen van de gammaspectrometrie : laboratoriummeting op poeder en kernen, luchtvervoerde prospectie, oceanografie en zeeprospectie (snelle cartografie, hydrodynamische en sedimentologische studies, verontreiniging en ordening van de kust...), boringstudies (natuurlijke diagraphie, opsporen van metalen door neutronen activering).

* Laboratoire de Minéralogie et Géologie Appliquée de la Faculté polytechnique de Mons. 9, rue de Houdain B-7000 Mons.

ZUSAMMENFASSUNG

Nach einem kurzen Überblick über den Einsatz von Strahlenzählern bei der Bodenforschung sowie über die durch die Einführung der Szintillatoren erzielten Fortschritte wird das Interesse der Gammaskpektrometrie in der angewandten Geologie besonders unterstrichen :

- gleichzeitige Dosierung der radioaktiven Elemente U-Th-K im Laboratorium bzw. auf dem Gelände ;
- Untersuchung des U-Ra-Ungleichgewichtes in den geochemischen Prozessen des Auslaugens oder des Niederschlags.

Zwei typische Beispiele veranschaulichen diese Betrachtungen :

- die Suche nach den Urananomalien im Granitgestein ;
- die Kennzeichnung der sedimentären Serien bei der Bohrung.

Die Wahl der Detektoren wird anschließend erörtert : Szintillatoren oder Halbleiterdetektoren. Im Rahmen der Wechselwirkung der Gammastrahlen mit dem Detektor wird auf die Eigenschaften der Szintillatoren eingegangen und deren Wahl im Hinblick auf die Zählkapazität, den Preis und die Abmessungen der Vorrichtung in Betracht gezogen.

Die Vor- und Nachteile der Halbleiter beim heutigen Stand der Technik werden erörtert. Zum Schluß wird auf die Entwicklung neuer Detektoren hingewiesen.

Danach wechselt man über zu den Anwendungsgebieten der Gammaskpektrometrie : Messungen im Labor mit Pulver- und Möhrenproben, Prospektion auf dem Luftweg, Meeresforschung (schnelles Kartenzeichnen, hydrodynamische bzw. sedimentologische Untersuchungen, Umweltverschmutzung und Küstenraumplanung...), Untersuchungen mittels Bohrungen (Naturdiagraphie, Metallforschung durch Neutronenaktivierung).

SUMMARY

After briefly recalling the use of radiation counters in prospecting work and the progress achieved by the introduction of scintillators, the article stresses the value of gamma spectrometry techniques in applied geology :

- simultaneous quantitative determination of U-Th-K in the laboratory or in the field,
- study of the U-Ra imbalance in the geochemical processes of leaching or precipitation.

Two typical examples illustrate these points :

- the search for uranium anomalies in the granitic rocks,
- the characteristics of the sedimentary series in boreholes.

The problem of choosing the detectors is dealt with first : scintillation probes or semi-conductors. The features of the scintillation probes are discussed in connection with the interaction of the gamma rays with the detector. The article examines the choice of such a device in terms of the counting performance and the price and size of the apparatus. The advantages and disadvantages which they offer in the present state of semi-conductor technique are reviewed. Finally, reference is made to the development of new detectors.

The article then turns to the application of gamma spectrometry : laboratory measurements on powder and core samples, airborne prospecting techniques, oceanography and prospection at sea (high-speed mapping, hydrodynamic and sedimentological studies, pollution, planning of coastal areas, etc.), borehole investigations (natural diagraphy, search for metals by neutron activation).

1. INTRODUCTION

L'utilisation de la radioactivité en géologie appliquée n'est pas nouvelle. Nous rappellerons, à l'occasion de ces Journées organisées en l'honneur du Professeur I. de Magnée, ses travaux sur l'emploi du compteur Geiger en vue de faciliter les corrélations stratigraphiques (localisation des niveaux marins dans le Houiller¹⁸), ainsi que ses notes de synthèse destinées à promouvoir l'emploi du Geiger en

prospection minière¹⁷. Cependant, les progrès réalisés dans l'utilisation des détecteurs de rayonnement et l'introduction des analyseurs à multicanaux permettent d'envisager sous un angle nouveau l'analyse du contenu en radio-éléments des roches¹. C'est ainsi que nous avons orienté, à la Faculté polytechnique de Mons, une partie de nos travaux dans cette voie en créant un petit groupe de recherche sur le thème spectrométrie gamma et géologie appliquée.

Si, il y a quelques dizaines d'années, le Geiger constituait le détecteur le plus employé en prospection, le scintillateur devait par la suite s'imposer et ce, pour plusieurs raisons. Son rendement ou efficacité en gamma est nettement supérieur à celui des compteurs Geiger. En outre, l'intérêt des détecteurs à scintillation réside dans le fait que l'amplitude des impulsions à la sortie du détecteur est proportionnelle à l'énergie des rayonnements, ce qui permet, par l'adjonction d'un discriminateur ou d'un sélecteur d'amplitude, de trier les impulsions en fonction de leur hauteur ou, autrement dit, de faire de la spectrométrie de rayonnement. De plus, cette discrimination des énergies facilite l'élimination du mouvement propre des scintillateurs, par ailleurs beaucoup plus élevé que celui des compteurs Geiger. Elle permet ainsi, même sur un appareillage classique portable, de bénéficier du rendement élevé en gamma tout en réduisant le bruit de fond. Un progrès technologique extrêmement important a été réalisé il y a une quinzaine d'années par l'introduction des analyseurs de hauteur d'impulsions à mémoire magnétique ou analyseurs à multicanaux. Grâce à eux, il devenait possible d'enregistrer l'ensemble du spectre en une seule mesure et non plus point par point comme cela devait être fait avec les spectromètres anciens.

Les scintillateurs couplés aux analyseurs à multicanaux constituent les éléments de base de la spectrométrie gamma classique

L'intérêt de la spectrométrie gamma en géologie appliquée réside dans les possibilités qu'elle offre tant en laboratoire qu'« in situ » pour :

- le dosage simultané, non destructif et facilement automatisé des principaux radioéléments naturels,
- l'étude du comportement des radioéléments dans les phénomènes de déséquilibre radioactif.

Ce deuxième point mérite d'être quelque peu développé.

2. LE DESEQUILIBRE RADIOACTIF DANS LE CADRE DES APPLICATIONS DE LA SPECTROMETRIE GAMMA EN GEOLOGIE APPLIQUEE

Les principaux radioéléments naturels (U et Th) forment plusieurs familles radioactives dont les radioisotopes descendent les uns des autres jusqu'à l'obtention d'un élément stable final : le plomb (fig. 1).

Dans une famille radioactive naturelle, un équilibre s'établit au bout d'un temps égal à dix fois environ la période des descendants successifs, la proportion des éléments étant alors constante et fonction de leur demi-vie. Dans le cas du Th_{232} , l'équilibre est réalisé en 70 ans. Dans le cas de l' U_{238} , l'équilibre n'est atteint qu'au bout d'un million d'années à cause de la présence de deux descendants à longue période (U_{234} et Th_{230}).

Or, les descendants de l' U_{238} appartenant à des cases très variées du tableau périodique ont des comportements chimiques très différents (le radon est un gaz rare, le radium est un alcalino terreux...).

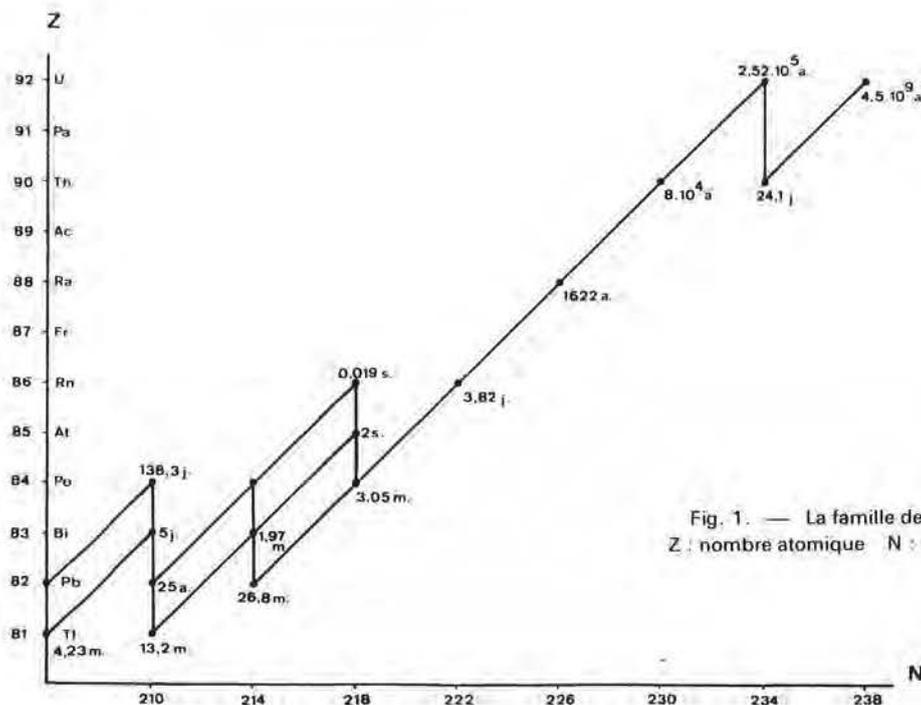


Fig. 1. — La famille de l'uranium 238.
Z : nombre atomique N : nombre de masse.

Une mise en solution préférentielle de l'un ou l'autre de ces éléments est donc courante et conduit à une rupture d'équilibre par lessivage sous l'action des eaux d'infiltration ou par précipitation des produits lessivés.

Ainsi, peut-on rencontrer dans la nature des minerais ou des roches en état d'équilibre très varié⁷. Le tableau I résume quelques cas possibles⁸:

TABLEAU I

	1	2	3	4	5
U	1 %	2 %	0,1 %	0,1 %	1,5 %
Th ₂₃₀	1 %	1 %	1 %	0,1 %	1,5 %
Ra ₂₂₆	1 %	1 %	1 %	1 %	1,5 %
Bi ₂₁₄	1 %	1 %	1 %	1 %	1 %

- 1 — minerai en équilibre (les teneurs sont exprimées en équivalent uranium).
- 2 — dépôt récent d'uranium (l'équilibre n'est pas atteint).
- 3 — formation uranifère lessivée.
- 4 — minerai enrichi en radium (dépôt de source).
- 5 — cas d'une fuite de radon (lors des sondages).

Or, il faut savoir que l'utilisation de la radioactivité en prospection ou exploitation minière est généralement basée sur la mesure du rayonnement radioactif global, rayonnement lié aux descendants à courte vie (Bi₂₁₄, surtout) dont les gammas sont les plus pé-

nétrants. Ainsi, une erreur par excès ou par défaut peut être commise dans l'estimation des teneurs en uranium suivant que le minerai en déséquilibre est enrichi en radium (départ préférentiel de l'uranium dont la mise en solution est aisée — cas 3) ou en uranium (pechblende de cémentation — cas 2).

Seule, une méthode de dosage sélectif par spectrométrie peut conduire à une estimation correcte tout en facilitant la compréhension des processus géochimiques de lessivage ou de précipitation ayant joué sur le minerai étudié.

Afin de souligner l'intérêt que peut présenter un dosage ou du moins sur le terrain une discrimination des contributions respectives des divers radioéléments (U-Ra-Th-K), nous donnons quelques exemples extraits d'un travail effectué par H. Meys²⁰.

3. QUELQUES EXEMPLES SOULIGNANT L'INTERET DE LA SPECTROMETRIE GAMMA EN GEOLOGIE APPLIQUEE

a) La radioactivité des granites et la prospection des gîtes uranifères

Le tableau II est une synthèse des mesures effectuées sur les granitoïdes du massif de Ploumanac'h, massif complexe constitué de trois grandes unités: de l'extérieur au cœur du massif $\gamma 1 - \gamma 2 - \gamma 3$. Ce massif a été étudié récemment dans le cadre des relations thermoluminescence-radioactivité par Ch. Dupuis¹⁰.

TABLEAU II

	Faciès	Th(ppm)	U(ppm)	K ₂ O(%)	Th/U	RT ^c /min
$\gamma 1$	$\gamma 1a$	140,4	28,9	4,53	4,77	280
	$\gamma 1b$	59,1	12,53	4,98	4,61	221
	$\gamma 1c$	20,16	5,44	2,48	3,49	102
$\gamma 2$	$\gamma 2a$	37,05	16,93	4,41	2,11	199
	$\gamma 2aH$	17,45	5,53	4,38	2,77	152
	$\gamma 2b$	28,2	16,02	4,79	1,73	158
$\gamma 3$	$\gamma 3a$	29,15	8,03	4,56	3,47	165
	$\gamma 3b$	27,95	8,03	4,57	3,29	153

A titre de comparaison, la radioactivité totale a été mesurée avec un dispositif en anticoincidence. Elle fluctue dans une fourchette étroite de 100 à 280 cps/min, alors que des variations en teneur du Th — de 17 à 140 ppm — et de l'U — de 5 à 29 ppm, sont grandes.

La teneur en potassium est pratiquement constante, à l'exception des roches basiques $\gamma 1c$.

Or, le potassium possède la plus grande activité de ces trois radioéléments. Un rapide calcul permet d'établir qu'un gramme d'U₂₃₈ représente une source de 0,33 microcurie, un gramme de Th₂₃₂ — 0,11 microcurie et un gramme de K₄₀ une activité de 6,8 microcurie.

Si l'on tient compte des teneurs en Th et U (de l'ordre de quelques dizaines de ppm), dans les roches

granitiques, on peut montrer que la contribution du potassium est prépondérante dans la mesure de la radioactivité globale. Cette contribution s'accroît en fonction des teneurs plus faibles de l'U et du Th. Elle masquera la présence de ces derniers éléments. De ce fait, la radioactivité globale n'est pas le reflet des variations de teneurs en uranium des roches granitiques.

Cette première constatation montre l'importance que la spectrométrie gamma peut prendre dans la prospection des gîtes uranifères.

La grande variabilité du rapport Th/U est un autre fait à signaler. Le rapport le plus communément admis dans les roches magmatiques est voisin de 3. En réalité, il peut varier considérablement, parfois inférieur à 1, il peut atteindre 10-15 et davantage. Les fluctuations du rapport Th/U ont été discutées par divers auteurs ^{1, 2, 3}. Elles peuvent être liées au caractè-

re du milieu (oxydant ou réducteur) au cours de la cristallisation, au phénomène de lessivage ou d'altération épigénétique ou à l'individualisation de microcristaux d'uraninite (Th/U faible) ou de minéraux thorifères (Th/U élevé).

Or, on sait par exemple que les microcristaux d'uraninite dans un granite constituent une forme facilement mobilisable d'uranium à partir de laquelle peuvent se constituer des gîtes exploitables. Ces dernières constatations montrent l'intérêt que peut prendre l'étude du rapport Th/U dans la prospection des gîtes uranifères.

b) La radioactivité des roches sédimentaires et la diagraphie nucléaire

Nous avons l'an dernier porté notre attention sur le sondage d'Hainin dans le Dano-Montien marin et le Montien continental. La figure 2 est une synthèse des

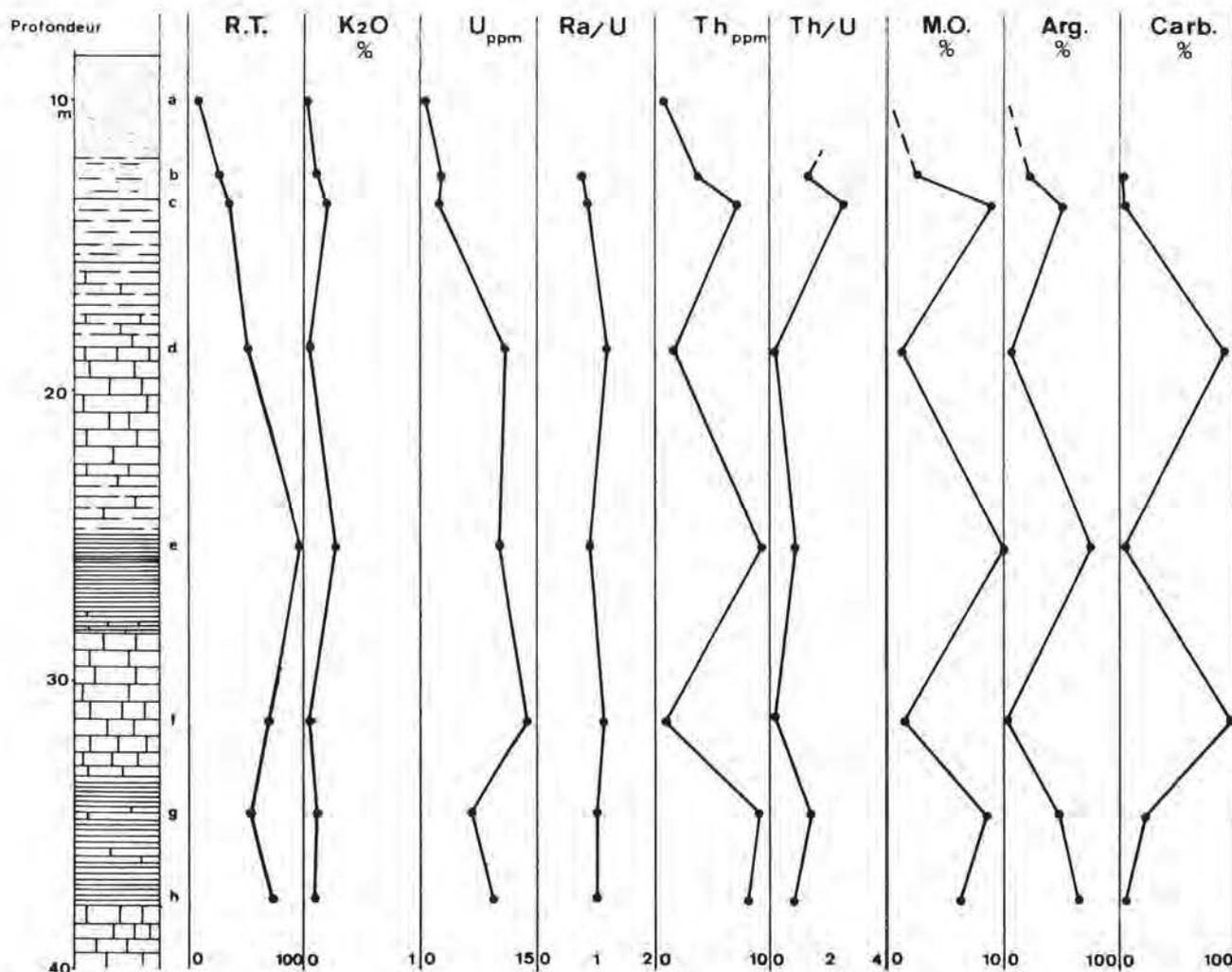


Fig. 2. — Logs gamma sur les carottes du sondage d'Hainin.
 RT : radioactivité globale (en c/minute)
 MO : matières organiques
 Arg : minéraux argileux
 Carb : carbonates.

travaux effectués par notre laboratoire sur la répartition des radioéléments dans les carottes extraites de ce sondage. Les résultats sont comparés à la lithologie et aux études chimique et minéralogique réalisées par F. Robaszynski ¹³.

On remarque, à propos de cette figure, pour le thorium

- teneur très variable ;
- excellente corrélation positive avec la teneur en matières organiques et minéraux argileux ;
- excellente corrélation inverse avec la teneur en carbonates ;

pour le potassium

- teneur faible (environ 0,1 % en K_2O) même pour les niveaux marneux (il est à noter que les argiles du Montien continental contiennent principalement de la montmorillonite) ;

pour l'uranium

- teneur élevée dans les horizons marneux (ce qui est classique) ;
- teneur anormalement forte dans les calcaires à Chara.

En fait, le comportement géochimique de l'uranium est complexe. Classiquement, on considère que l'uranium, élément facilement soluble, précipite préférentiellement en milieu réducteur. Toutefois, la fixation de certains isotopes de la famille U_{238} par les organismes est possible, compliquant leur distribution en les introduisant dans les roches carbonatées.

De tout cela, il résulte qu'en diagraphie gamma classique, l'étude d'un tel sondage serait particulièrement laborieuse. En effet, de par la teneur faible en potassium des niveaux argileux et de par la teneur élevée en uranium des calcaires, la distinction de ces niveaux en comptage gamma global devient difficile. C'est ce qui ressort notamment de la colonne 1. Ce deuxième exemple montre à suffisance l'intérêt que revêt la spectrométrie γ en diagraphie nucléaire. Le problème cependant n'est pas simple. Nous avons l'intention de l'aborder tant sous son aspect technologique que sous l'angle de l'interprétation des données en vue d'en déduire la répartition vraie des teneurs en radioéléments et l'évolution de certains paramètres caractéristiques des formations.

4. LE CHOIX DU DETECTEUR, PROBLEME ESSENTIEL EN SPECTROMETRIE GAMMA APPLIQUEE A LA PROSPECTION

Un des problèmes technologiques essentiels en spectrométrie gamma et plus particulièrement en spectrométrie gamma appliquée à la diagraphie a trait au choix du détecteur. Les détecteurs les plus fréquemment utilisés restent *les sondes à scintillation*. Le type le plus courant est un cristal $Nal(Tl)$ et dont les

photons de fluorescence issus de l'interaction des γ avec le cristal sont transformés par l'intermédiaire d'un tube PM en impulsions proportionnelles à l'énergie du gamma incident. L'interaction du γ avec le cristal peut suivre des modalités différentes (effet photoélectrique, effet Compton, création de paires). C'est ainsi qu'à la raie photoélectrique bien individualisée dans le spectre et dont l'énergie est caractéristique du radioélément vient s'ajouter un rayonnement secondaire à plus basse énergie et donnant lieu à un spectre plus continu (fig. 3).

La proportion relative de dissipation par effet photoélectrique ou par effet secondaire est liée à l'énergie des gammas incidents, à la nature du détecteur et à ses dimensions. Plus les gammas sont de haute énergie et plus les effets secondaires sont importants.

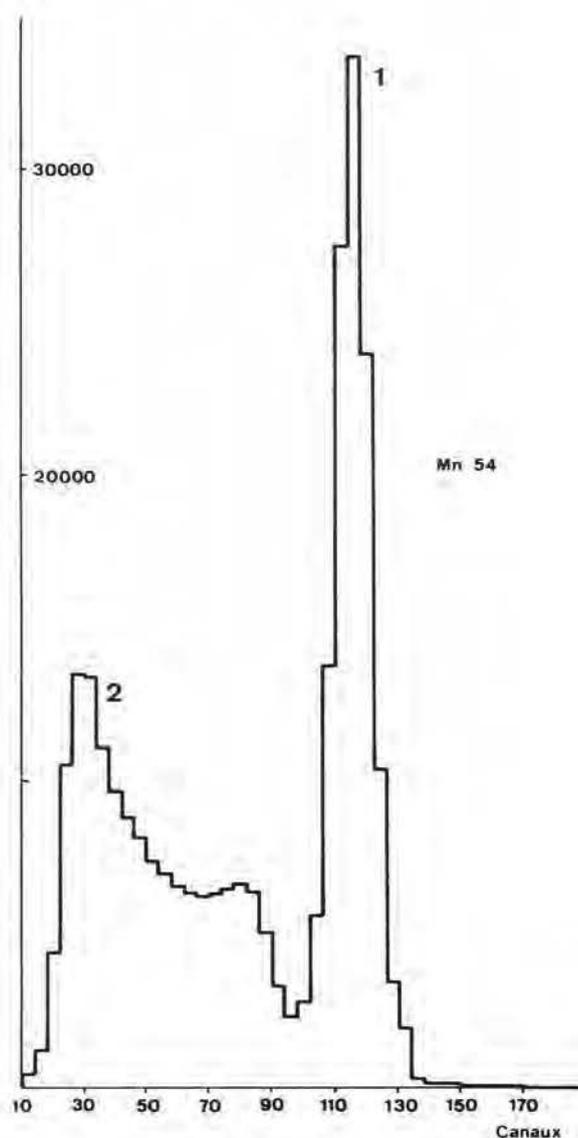


Fig. 3. — Spectre d'un radioélément isolé.
1 : pic photoélectrique
2 : bosse Compton et émission secondaire.

Au contraire, plus le détecteur est volumineux et plus la probabilité d'une dissipation par effet photoélectrique est grande. En outre, le rendement ou l'efficacité en gamma augmente avec les dimensions du cristal,

On a donc tout intérêt à utiliser des cristaux de grande dimension, principalement dans l'étude de la partie à haute énergie du spectre. Malheureusement, les prix s'élèvent également avec la dimension des détecteurs. Le choix du cristal résulte donc d'un compromis entre son coût, son rendement en gamma et bien sûr l'encombrement du dispositif.

Il faut enfin souligner que le spectre gamma d'une roche est complexe. Le Th_{232} et l' U_{238} forment des familles radioactives, chacun des descendants étant susceptible de donner des émissions gammas dont l'énergie sera caractéristique du radioisotope considéré (fig. 4). De plus, chaque raie sera accompagnée d'une émission secondaire (Compton...) à plus basse énergie. Ainsi, la raie à 1,48 MeV du K_{40} est influencée par les rayonnements secondaires du thorium et de l'uranium. Son intensité n'est donc pas directement proportionnelle à la teneur en potassium radioactif de la roche. C'est une notion dont il faut tenir compte dans tous les problèmes de dosage par spectrométrie gamma. Les considérations que nous venons d'émettre à propos des scintillateurs montrent que tout progrès réalisé dans la conception de nouveaux détecteurs sera susceptible de rendre de grands services en géologie appliquée.

La mise au point vers les années 1960 des détecteurs semi-conducteurs, encore appelés *semicteurs*, améliora considérablement les possibilités de la spectrométrie gamma. En effet, un des inconvénients des scintillateurs est leur mauvaise résolution. Or, le spectre gamma des roches étant complexe, on a tout intérêt à accroître la discrimination des raies voisines par une bonne résolution du dispositif détecteur. Pour des raisons d'ordre théorique, on peut montrer que l'utilisation d'une chambre d'ionisation solide permet d'augmenter considérablement la résolution ¹¹.

Les détecteurs à jonction (Ge-Li) dans lesquels le Li joue le rôle de compensateur de charges sont à l'heure actuelle les plus classiques. Ils présentent une haute résolution jointe à une bonne efficacité (fig. 5). Cependant dans l'état de la technique, le dispositif est assez encombrant pour la prospection. En effet, la mobilité du Li étant grande dans le réseau du germanium, le détecteur doit être refroidi en permanence à -150°C. Des détecteurs Ge-Li refroidis à l'azote liquide sont cependant utilisés depuis quelques années en diagraphie ^{21 11}. Evidemment, des semicteurs travaillant à température ambiante seraient beaucoup plus intéressants. Divers laboratoires de sciences nucléaires travaillent la question ²¹. Malheureusement à l'heure actuelle, ces nouveaux semiconducteurs sont de trop petite dimension pour que l'efficacité de détection d'un rayonnement naturel, généralement faible, soit suffisante.

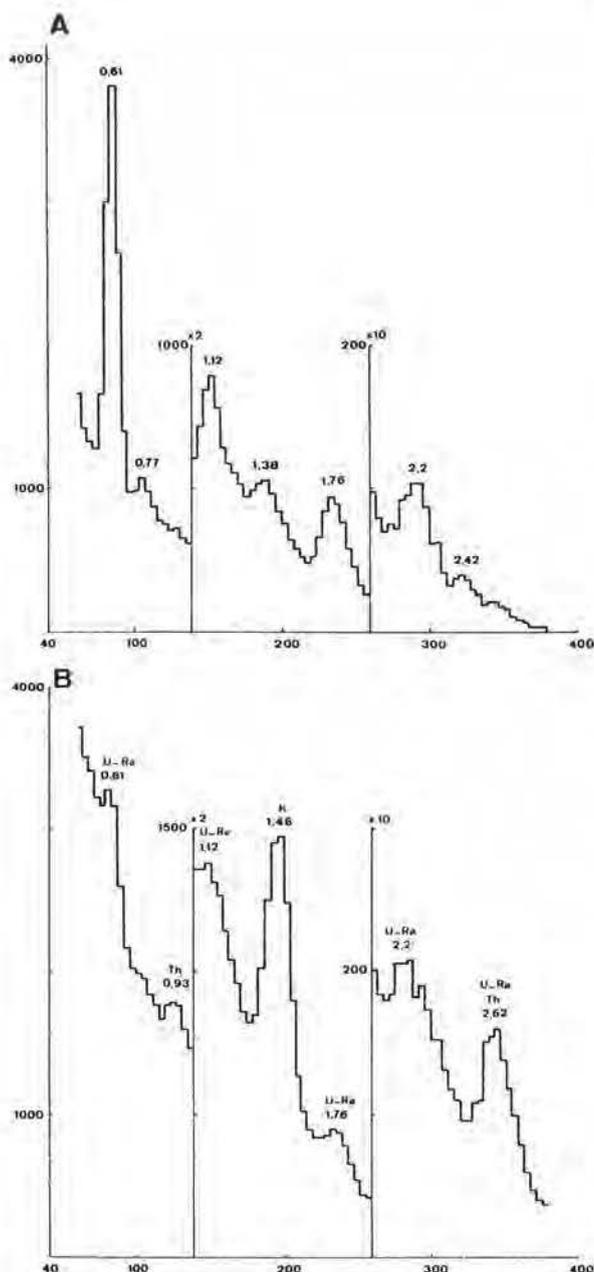


Fig. 4. — Spectre d'un étalon d'uranium à 22 ppm (A) comparé au spectre de l'argile yprésienne (B) en abscisse : numéro du canal ou énergie des gammas en MeV en ordonnée : contenu du canal ou nombre de gammas d'énergie donnée.

5. LES DOMAINES D'UTILISATION DE LA SPECTROMETRIE GAMMA EN GEOLOGIE APPLIQUEE

La spectrométrie gamma peut être appliquée en laboratoire ou sur le terrain en prospection au sol, aéroportée, marine ainsi que dans l'étude des sondages. *Au laboratoire*, la spectrométrie gamma est utili-

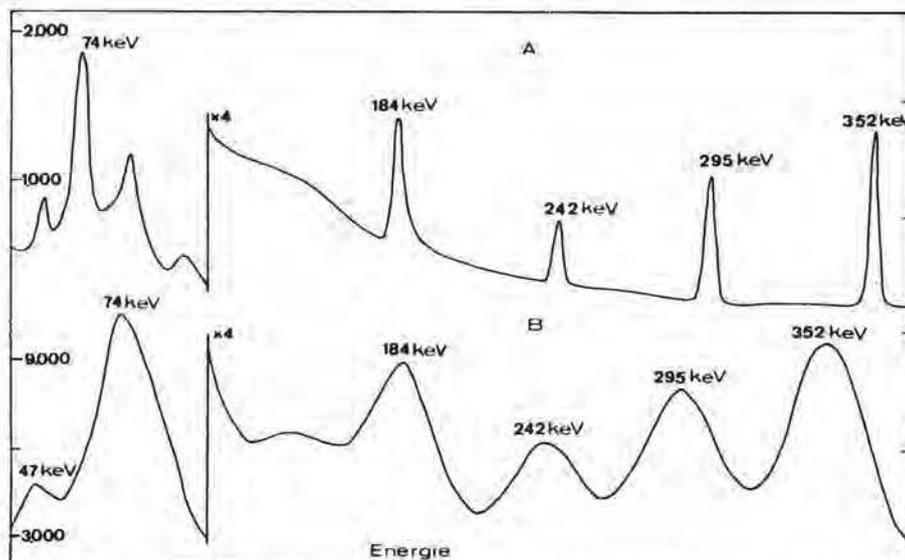


Fig. 5. — Comparaison du spectre à basse énergie d'un minéral uranifère obtenu au moyen d'un semicteur Ge/Li (en A) et d'un détecteur classique à scintillation (en B).

sée pour le dosage simultané des radioéléments U-Ra-Th-K et l'étude de l'équilibre U-Ra. Les mesures sont habituellement effectuées sur poudre²⁰.

Des appareils ont également été imaginés pour travailler directement sur carottes¹⁶.

En prospection aéroportée, la spectrométrie gamma se révèle indispensable²¹. En effet, le scintillateur balaie une aire circulaire dont le rayon est sensiblement égal à la hauteur du plan de vol. Si cette aire est granitique, il est difficile de distinguer les radiations utiles dues à un gisement uranifère des radiations uranothorifères dues au massif granitique lui-même, l'effet de masse intervenant directement. Par contre, l'utilisation d'un spectromètre permet la discrimination des émissions liées à un gisement d'uranium de l'émission liée à des roches magmatiques ou métamorphiques uranothorifères.

La prospection aéroportée fut également appliquée aux études hydrogéologiques¹⁹.

En océanographie et océanographie appliquée, un appareillage vient d'être mis au point par le laboratoire de sédimentologie marine de Perpignan en collaboration avec le laboratoire de Gif-sur-Yvette¹². Les problèmes liés à la variation du taux de comptage avec le degré d'enfoncement de la sonde ont été résolus par l'emploi d'une source étalon de Hg₂₀₃ dont l'intensité du pic à 279 keV permet de corriger les données brutes. La carte des activités en Hg₂₀₃ est en outre une carte du taux d'enfoncement dans le sol et a donc la signification d'une carte géotechnique. En océanographie, la spectrométrie gamma permettra de tracer rapidement les cartes de faciès sur le plateau continental. Elle ouvre des perspectives intéressantes

dans la prospection du domaine marin actuel (recherche des phosphates...²⁴).

Un autre type d'application a trait à la mesure in situ du poids de matière en suspension dans les fleuves paramètre d'accès généralement difficile²².

En dehors de la radioactivité naturelle, les variations de la radioactivité artificielle, en domaine sédimentaire au large des centrales nucléaires, permettent d'analyser l'évolution hydrodynamique et sédimentologique récente^{14 et 15}.

En fonction de l'évolution de la radioactivité du Cs₁₃₇ rejet de la centrale de Marcoule, sur carottes prélevées en mer, on a pu calculer la vitesse de sédimentation dans le delta du Rhône^{14 et 15}.

La répartition du Cs₁₃₇ permet donc d'atteindre des phénomènes sédimentologiques lents et fournit des données intermédiaires entre les mesures actuelles, résultat de l'utilisation de traceurs à durée de vie limitée, et les observations géologiques. Ces données sont particulièrement intéressantes dans l'étude des transits sédimentaires récents et, par conséquent, dans les problèmes de pollution et d'aménagement du littoral.

Enfin, la spectrométrie gamma est susceptible d'être appliquée en *diagraphie nucléaire*. Nous avons déjà énoncé ce problème et montré l'intérêt de la spectrométrie gamma dans l'analyse des radioéléments en série calcaromarneuse (cas du sondage d'Hainin, par exemple). Il est certain que, dans ces problèmes où l'on se voit limité par l'encombrement du détecteur et où l'on souhaite pouvoir exploiter au maximum le spectre, les progrès réalisés dans la mise

au point de détecteurs nouveaux sont susceptibles de jouer un rôle primordial. On peut également espérer que l'utilisation d'une source neutron adéquate permettra d'appliquer en sondage la méthode d'analyse par activation neutronique à la recherche de certains métaux. Un équipement de terrain est d'ores et déjà mis au point²¹, il est à souhaiter que cette méthode de dosage particulièrement bien adaptée à la recherche de certains éléments sera davantage utilisée en prospection minière.

Ce bref tour d'horizon montre toutes les possibilités de la spectrométrie gamma en géologie de l'ingénieur. Les progrès technologiques de ces dernières années nous permettent ainsi d'étendre les domaines d'application de cette méthode en réalisant aujourd'hui ce que le Geiger des années 50 ne pouvait prétendre atteindre.

BIBLIOGRAPHIE

[1] ADAMO J. et GAGARINI P. — Gamma-ray spectrometry of rocks. Elsevier - Londres - 1970, 279 p.

[2] ANDRIEUX C. — Spectrométrie gamma dans les forages avec un semicteur Ge(Li). Application à la mesure de la teneur en uranium des roches. - Thèse de Doct. Univ., Paris VI, 1972.

[3] BALEINE O., CHARLET J.M., DUPUIS Ch. et MEYS H. — Dosage par spectrométrie gamma des radioéléments naturels. Application à l'étude de quelques formations du Bassin de Mons. *Annales Scientifiques du Département Mines-Géologie*, 1976, p. 9-29.

[4] CHARLET J.M. — Utilisation du spectre gamma à basse énergie (20-610 keV) dans la détermination des minéraux radioactifs. Quelques cas d'application. *Bull. Soc. fr. Minéral Cristallogr.*, 1968, 91, p. 151-165.

[5] CHESSELET R. et MARTIN J.M. — Note sur l'application de la spectrométrie gamma in situ à l'étude du débit solide dans l'estuaire de la Gironde. *Revue de Géogr. physique et de Géol. Dynamique*, 1969, vol. 11, fasc. 1, p. 123-126.

[6] COPPENS R. — Sur la radioactivité des granites. *Colloque E. Raguin « les roches plutoniques dans leurs rapports avec les gîtes minéraux »*. Masson & Cie, Paris 1973, p. 44-61.

[7] COPPENS R., DURAND G., JURAIN G. — Equilibre et déséquilibre radioactifs dans les minéraux et les roches. *Sciences de la Terre*, 1965, t. 10, p. 105-131.

[8] COULOMB R. — Equilibre radioactif des minerais uranifères. *Bulletin technique et scientifique du C.E.A.*, n° 88, novembre-décembre 1964.

[9] DUMESNIL P. — Sonde de radioprospection avec semicteur Ge(Li). *Industrie Minérale, Colloque de géophysique minière*, n° spécial du 15.5.73, p. 169-171.

[10] DUPUIS Ch. — Relations entre les faciès d'un massif granitique à structure concentrique (le massif de Ploumanac'h, Géologie et thermoluminescence) Thèse de doctorat Univ., Lille, 1975.

[11] FETTWEIS P. — Les détecteurs à jonctions. Nouvel outil d'étude des rayonnements nucléaires. *Revue des questions scientifiques*, 1966, t. 137, n° 4, p. 487-515.

[12] GAUCHER J.C., GOT H., LABEYRIE J., LALOU C., LANSCART A. — Applications de la spectrométrie gamma « in situ » à la cartographie granulométrique sous-marine. *Bulletin du B.R.G.M.*, 1974, 2e série, section IV, n° 4, p. 231-241.

[13] GODFRIAUX I., ROBASZYNSKI F. — Le Montien Continental et le Dano-Montien marin des sondages de Hainin (Hainaut-Belgique). *Annales Soc. Géol. Belgique*, 1974, t. 97, p. 185-200.

[14] GOT H. — La radioactivité des sédiments au large de l'embouchure du Grand-Rhône. *Rapp. Comm. int. Mer Médit.*, 1972, 21, 6, p. 281-285.

[15] GOT H. et PAUL H. — Etude de l'évolution dynamique récente au large de l'embouchure du Grand-Rhône par l'utilisation des rejets du Centre Nucléaire de Marcoule. *C.R. Acad. Sciences, Paris*, 30-11-70, série D, p. 1956-1959.

[16] LOVBORG L., WOLLENBERG H. et al. — Drill-core scanning for radio-elements by gamma-ray spectrometry. *Geophysics*, 1972, vol. 37, n° 9, p. 675-693.

[17] de MAGNEE I. — Quelques aspects de l'emploi du compteur Geiger-Muller en prospection minière. *Bull. Inst. Royal Colonial belge*, 1949, t. 20, fasc. 4, p. 900-928.

[18] de MAGNEE I. — Observations sur la radioactivité des horizons marins du Westphalien belge. *C.R. 3e Congrès de stratigraphie et de géologie du Carbonifère*, Heerlen, 1951, p. 429-434.

[19] MAURIN C. — Mise en évidence par levés aériens à basse altitude, des anomalies radioactives. Exemple d'application à l'étude hydrogéologique de la plaine de Kopais (Beotie, Grèce continentale). *C.R. Acad. Sc., Paris*, 22.9.75, série D, p. 763-766.

[20] MEYS H. — Dosage par spectrométrie gamma des radioéléments U-Th-K. Intérêt en prospection géophysique. Travail fin d'études. *Faculté polytechnique de Mons*, 1975, section Mines.

[21] Nuclear techniques and mineral resources. *International Atomic Energy Agency*, Vienne, 1969.

[22] ROBBIN J.A. et EDGINGTON — Determination of recent sedimentation rates in Lake Michigan using Pb-210 and Cs₁₃₇. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, mars 1975, vol. 39, n° 3, p. 285-304.

[23] SIFFERT P., PONPON J.P., CORNET A. — Détecteurs de rayonnements nucléaires à semiconducteurs, évolution récente. *L'onde électrique*, 1975, vol. 55, n° 5, p. 281-297.

[24] SUMMERHAYES C.D. et al. — Phosphorite prospecting using a submersible scintillation counter. *Econ. Geology*, 1970, 65, p. 718-729.