

# La prospection de l'uranium

par M. J. SNEL

## SAMENVATTING

Voor de opsporing van de uraanertsen maakt men gebruik van hun radioactiviteit. Deze eigenschap wordt aangetoond door Geiger-tellers en scintillometers, die de intensiteit van de gammastraling aanduiden. De ontleding van deze opsporingsmethode bewijst dat verschillende soorten stralingen in het omringende milieu kunnen aanwezig zijn. Men elimineert de stralingen die niet selectief zijn t.o.v. uraan door de systematisatie van de radiometrische metingen en door het gebruik van tellers waarvan de gevoeligheid aangepast is aan de verschillende stadia van de prospectie.

De verschillende stadia van de benadering van de afzetting zijn : de strategische of vliegende prospectie, de half-systematische prospectie en de taktische of systematische prospectie.

Bovendien moet een vindplaats voldoen aan criteria die vóór iedere ontginning hun concurrentiële situatie t.o.v. de huidige ontgonnen afzettingen moeten bepalen. Ten einde de renderende of de potentiële uraanmijnen te onderscheiden, wordt beroep gedaan op de geochemie, de fluorimetrie en verschillende andere laboratoriumproeven, zoals nogmaals de radiometrie, evenals de Röntgenspectrografie en de metallogenische studie.

De radiometrie laat bovendien toe waardevolle gegevens te verzamelen bij een geologische opname. Ten slotte dient nog de aandacht gevestigd op het gevaar dat de gamma-straling kan vormen voor de prospectors en de mijnwerkers die eraan blootgesteld zijn.

## RESUME

La radioactivité des minéraux uranifères permet leur détection. Cette propriété est mise en évidence par des compteurs Geiger et des scintillomètres, qui mesurent l'intensité du rayonnement gamma. L'exposé de cette méthode de recherche démontre que diverses sources de rayonnements peuvent interférer dans le milieu ambiant. On élimine les rayonnements non sélectifs vis-à-vis de l'uranium par la systématisation des mesures radiométriques et par l'utilisation de compteurs dont la sensibilité est adaptée aux divers échelons de la prospection.

Les stades d'approche du gisement sont : la prospection stratégique ou volante, la prospection semi-systématique et la prospection tactique ou systématique.

En outre, un gisement doit répondre à des critères qui établiront préalablement à toute exploitation, son caractère concurrentiel par rapport aux gisements actuellement exploités. La géochimie, la fluorimétrie et diverses autres méthodes de laboratoires, dont notamment encore la radiométrie et aussi la spectrographie X contribuent, avec l'étude métallogénique, à la définition des mines d'uranium rentables ou potentiellement intéressantes.

Dans un autre domaine la radiométrie peut apporter des données importantes pour l'exécution d'un levé géologique. Enfin, l'attention doit être attirée sur le danger que présente le rayonnement gamma pour les prospecteurs et les mineurs qui s'y trouvent exposés.

Le problème de la recherche de minerais d'uranium s'est posé après la découverte de l'énergie atomique en 1945. La première bombe atomique américaine déclencha dans le monde une vaste campagne de prospection pour la découverte de minerais d'uranium. Ce furent principalement des minerais de pechblende d'origines congolaise et canadienne qui servirent de matières premières durant les premiers stades des recherches, mais rapidement les divers gouvernements intéressés par la possession du secret de la bombe atomique élaborèrent des programmes, pour procéder à l'inventaire de leurs propres ressources en minerais d'uranium. Le Canada possédait déjà à cette époque un important gisement de pechblende dans la région du grand lac de l'Ours, tandis que l'U.R.S.S. se lançait dans une exploitation intense du gisement de Johakimstahl, actuellement Johakimov, en Tchécoslovaquie.

C'est cependant aux Etats-Unis que cette recherche prit un essor considérable sous la forme d'une vaste prospection publique sur toute l'étendue du territoire métropolitain. D'autres gouvernements confièrent cette recherche à des services géologiques spécialisés ou à des firmes privées de prospection. Ce fut le cas pour la France, l'U.R.S.S., le Congo belge, l'Australie, le Portugal, tandis que le Canada et les U.S.A. s'engagèrent dans la même voie déjà avant l'abandon de la prospection publique.

### 1. Evolution des recherches depuis la découverte de l'énergie atomique.

Dès le 1<sup>er</sup> août 1946, par l'Atomic Energy Act, les U.S.A. codifièrent la prospection publique de l'uranium. La recherche était abandonnée à tous, sur toute l'étendue d'un domaine comprenant une vaste partie du territoire. Certaines zones en étaient soustraites pour réserver des droits acquis ou pour protéger les recherches menées par les services géologiques de l'Etat. Chaque prospecteur était autorisé à délimiter un certain nombre de claims (lots), qu'il pouvait, en cas de découverte, mettre en exploitation ou céder à des tiers dans ce but. La seule condition qui lui était imposée était de vendre ses produits à la Commission de l'Energie Atomique. Les tarifs fixés lui laissaient de plantureux bénéfices. Les prix payés au producteur pouvaient s'échelonner depuis 350 F la tonne pour du minerai à un dixième de pour cent de  $U_3O_8$  jusqu'à 85.000 F la tonne pour du minerai à 10 % de  $U_3O_8$ . Les frais de transport étaient de plus à charge de l'acheteur.

Cette recherche publique connut sa plus grande vogue vers les années de 1945 à 1955. Malgré l'importance des moyens employés et le nombre de personnes qui s'y consacrèrent, les résultats de cette prospection n'ont pas été considérables. A quelques exceptions près, on en cite principalement deux : les

découvertes des prospecteurs nommés Stern et Pick, la plupart des mines exploitées étaient tout au plus marginales et beaucoup ont été abandonnées depuis lors.

Un des derniers « rush » pour la prospection de l'uranium se produisit aux Etats-Unis dans l'Etat du Wyoming en 1955, lors de l'ouverture à la prospection publique de la région de Pumpkins Butte. Dès la nuit, les prospecteurs prirent possession de cette zone presque désertique pour y délimiter à l'aveuglette des terrains réservés à leurs recherches. Les journaux locaux se firent l'écho de cette prospection qui, sous certains aspects, mais en moins archaïque cependant, nous reporta de plusieurs dizaines d'années en arrière, vers la période faste du Klondyke canadien. Peu de temps après, le Gouvernement américain renonça à bonifier avantageusement les minerais à basse teneur. La normalisation des cours du minerai d'uranium suivit rapidement, surtout après la découverte d'un plus grand nombre de gisements à forte teneur en  $U_3O_8$ , notamment au Canada, en Australie, en France, aux U.S.A., en Afrique et probablement aussi en Sibérie.

Depuis quelques années, la demande de minerais d'uranium est limitée parce que les pays qui détiennent le secret atomique trouvent chez eux les matières premières indispensables. Les Etats-Unis disposent d'un stock considérable auquel doit être ajoutée la production des mines de l'Arizona, de l'Utah et du Nevada. Cette crise a amené l'arrêt de nombreuses exploitations et notamment celle de la mine de Shinkolobwe au Congo belge, laquelle a été, pendant de longues années, le principal producteur d'uranium du monde.

En 1961, beaucoup de mines d'uranium de France et de la Communauté française seront à leur tour arrêtées parce qu'elles ne bénéficieront plus des avantages que le gouvernement a accordés pendant la durée de mise au point de la bombe atomique française.

Les gisements actuellement connus et exploités suffisent largement pour assurer les besoins du monde en uranium ; il est cependant probable que tôt ou tard l'industrie atomique va connaître un nouvel essor grâce à des techniques nouvelles, notamment le mode de conversion de l'énergie nucléaire, et que, dans ces conditions, une nouvelle période faste pourrait commencer dans l'histoire de l'uranium. Dans ce cas, le cours des minerais d'uranium remontera certainement, sans toutefois atteindre son niveau d'antan, et des mines actuellement marginales pourront reprendre leur activité. Mais, il est probable qu'une prospection publique ne sera plus encouragée par aucun gouvernement, maintenant que des réserves importantes de minerais d'uranium ont été découvertes et que les prospections peuvent désormais être faites selon des méthodes plus rationnelles.

## 2. Radioactivité des minerais d'uranium.

Toute une série de minéraux composés d'éléments instables au point de vue de leur constitution atomique se décomposent lentement dans la nature en émettant un rayonnement caractéristique, dénommé gamma par opposition aux rayonnements alfa et bêta connus antérieurement. Cette propriété caractéristique se retrouve dans presque tous les minéraux renfermant l'uranium et le thorium dans leur molécule constitutive ou dans leur réseau cristallin.

La recherche des minerais d'uranium et de thorium se base dès lors sur cette propriété. Les minerais primaires de l'uranium sont peu nombreux, on ne connaît pratiquement que 2 oxydes : la pechblende et l'uraninite, mais un grand nombre de minerais oxydés secondaires en dérivent et notamment les plus fréquents, qui sont l'autunite, la torbernite, la curite, la becquerilite, la tyuyamunite, la carnotite, etc.

D'autres minéraux, notamment les pentoxydes de niobium et de tantale et les oxydes de terres rares, sont souvent associés avec les oxydes d'uranium, sous la forme d'oxydes complexes tels que la fergusonite, la microlite, l'euxénite, la bétafite, la samarskite, et leurs produits d'altération : la gummite, la chalcolite, l'autunite et l'évansite. Par ailleurs, l'association des oxydes d'uranium et de thorium est fréquente. Mais le plus souvent, l'uranium est presque totalement éliminé des minéraux thorianifères, dont certains, comme par exemple la monazite, peuvent contenir de l'ordre de 1 % d' $U_3O_8$ . Cela est également le cas pour le zircon, mais dans ce cas, l'uranium est contenu dans les interstices du réseau cristallin.

La radioactivité est mise en évidence par l'usage de compteurs de Geiger et de scintillomètres. Au début de la prospection publique, l'opinion la plus répandue voulait que ces appareils pouvaient assurer à quiconque un moyen infailible pour déceler la présence d'uranium. Les déceptions furent cependant nombreuses et la prospection publique fut rapidement freinée par le grand nombre de résultats aberrants obtenus au moyen des compteurs de radioactivité. Plusieurs causes peuvent, en effet, provoquer une ionisation du tube de Geiger et la présence d'uranium n'est qu'une de ces causes. Les mesures de radioactivité obtenues au moyen de compteurs ne fournissent donc pas d'indices absolus au sujet de la présence d'uranium. Par ailleurs, les méthodes de prospection et le type de compteur à utiliser diffèrent d'après le minerai d'uranium que l'on recherche et d'après le mode de gisement que l'on suppose. La prospection de l'uranium relève de compétences indiscutables qu'il ne faut désormais plus rechercher dans le concours de prospecteurs non initiés. Quant à la métallogénie des gisements d'uranium, elle est maintenant suffisamment connue pour limiter l'extension des zones favorables.

Cet aspect de la question ne sera pas examiné dans la présente note. Je désire en effet me limiter à exposer les résultats d'une expérience acquise dans le domaine de la recherche de minerais d'uranium.

## 3. Compteurs de Geiger et compteurs à scintillations.

Lors du « rush » des années de l'après-guerre aux U.S.A., on a publié des notes explicatives à l'intention des chercheurs débutants afin de les orienter notamment dans le choix d'un type de compteur, puisque plusieurs centaines d'appareils différents se trouvaient à l'époque sur le marché.

En réalité, la construction de tous les compteurs de Geiger est basée sur un même principe ; ils ne diffèrent que par leur sélectivité, par leur sensibilité, par leur robustesse et par le mode d'alimentation.

Le compteur de Geiger est constitué d'un tube en verre contenant 2 électrodes placées dans un champ électrique. Lorsque des rayons  $\gamma$  provenant de matières radioactives traversent ce champ, elles ionisent le milieu entre les 2 électrodes et un voltage élevé peut passer de l'une à l'autre électrode. Cette ionisation et le passage du courant sont favorisés en introduisant un gaz dans le tube. Le passage du courant dans le tube déclenche, soit un ampèremètre, soit un signal acoustique, soit une ampoule au néon, qui, l'un et l'autre sont donc influencés par le nombre de rayons  $\gamma$  traversant le champ électrique du tube Geiger. Cette mesure est généralement exprimée et intégrée en milliroentgen par heure — une unité de radioactivité exprimée par unité de temps.

Le compteur à scintillations est généralement constitué par un cristal d'iodate de sodium activé, qui émet des scintillations chaque fois qu'un rayon  $\gamma$  vient frapper sa surface. Ces scintillations sont lues et enregistrées par un photomultiplicateur et transformées en impulsions électriques. Le cristal d'un scintillomètre réagit à environ 50 % des rayons gamma qui frappent sa surface. Le compteur de Geiger, par contre, n'est sensible qu'à 1 ou 1/2 % des rayons  $\gamma$ . La sensibilité du compteur à scintillations est donc de l'ordre de 50 à 100 fois supérieure à celle du compteur de Geiger.

Outre la graduation en milliroentgen par heure, ces appareils renseignent parfois le nombre d'impulsions électriques, nombre que l'appareil intègre directement sur une période de référence, laquelle peut être limitée par l'opérateur, selon qu'il utilise l'appareil en station ou en mouvement lent ou rapide. La période d'intégration, varie de une à plusieurs secondes.

Ses diverses caractéristiques destinent plus spécialement le compteur à scintillations à la prospection volante, effectuée en voiture ou même par avion. En régions minéralisées, le compteur de Geiger convient davantage parce qu'il ne réagit qu'au voisinage immédiat des gisements.

#### 4. Définition du « back-ground » ou de la radioactivité ambiante.

Les compteurs de Geiger et les scintillomètres mesurent la radioactivité totale de l'endroit où ils sont utilisés. Cette mesure ne traduit pas exclusivement l'état de radioactivité résultant de l'émission de rayons  $\gamma$  en provenance d'un minéral radioactif. La première indication fournie par ces compteurs concerne l'état de la radioactivité ambiante, dénommé « back-ground » par les auteurs anglais.

On peut assimiler le « back-ground » à un effet propre de radioactivité qui caractérise à chaque instant un point de la surface du globe suivant des lois, bien plus compliquées que celles qui régissent les variations du magnétisme et de la gravité. Dans la valeur de la radioactivité ambiante interviennent notamment des facteurs extra-terrestres en relation avec le rayonnement cosmique ; l'autre partie résulte d'un rayonnement terrestre, encore mal défini. Dans certaines zones, on a constaté que le « back-ground » est négatif par rapport à une moyenne régionale de la radioactivité ambiante ; ailleurs, il est anormalement élevé. On attribue ces différences à la constitution de la croûte terrestre, mais jusqu'à présent, on ne peut émettre à ce sujet que des hypothèses.

Le compteur de Geiger et le scintillomètre servent essentiellement à déterminer les anomalies de radioactivité causées par la présence de certaines roches ou de certaines formations géologiques. La valeur de la radioactivité anormale n'est dès lors que la différence entre la radioactivité enregistrée et le « back-ground ». Il en résulte qu'une détermination précise du « back-ground » est indispensable. On y procède en effectuant systématiquement des « tests » dans des zones ne comprenant aucun point singulier. En pratique, une valeur acceptable du « back-ground » peut résulter d'une seule mesure, effectuée au-dessus d'une nappe d'eau de plus d'un mètre d'épaisseur, puisque l'eau constitue un écran difficilement perméable aux rayons  $\gamma$ .

La terre de couverture intercepte également les rayons  $\gamma$ . Les émanations radioactives en provenance d'un filon uranifère sont complètement arrêtées lorsque l'épaisseur de la couche de terre qui recouvre ce filon atteint plusieurs mètres. Le compteur de Geiger doit dès lors être complété par un dispositif qui permet d'introduire le tube de détection dans les puits et les sondages, creusés à travers des formations superficielles. Ces tubes-sondes, raccordés par des câbles à l'appareil de mesure, permettent de mesurer la radioactivité de chacune des formations géologiques traversées. De même, les compteurs à scintillations sont parfois complétés par un dispositif de télémessure, lequel est constitué d'un cristal ou plusieurs cristaux disposés à l'extérieur des avions et des véhicules utilisés pour les prospections volantes.

#### 5. Usages spécifiques des compteurs de Geiger et des compteurs à scintillations.

Les rayons  $\gamma$  sont émis suivant un faisceau qui rayonne dans l'espace autour de la substance radioactive émettrice. L'étendue du secteur du faisceau intercepté par le tube de Geiger ou le cristal du scintillomètre est fonction de la distance à la substance radioactive. Il en est de même de la densité du rayonnement capté.

A une distance de quelques mètres, les compteurs de Geiger, dont la sensibilité est faible, ne parviennent plus à déceler la radioactivité d'un fragment de minerai radioactif, le nombre de rayons  $\gamma$  interceptés étant à peine supérieur à celui qui caractérise normalement le « back-ground ». On améliore la sensibilité des compteurs de Geiger en utilisant un tube plus grand ou un plus grand nombre de tubes. Certains de ces tubes revêtus intérieurement de bismuth sont plus sensibles, mais le prix de ces compteurs à haute sensibilité s'approche dès lors de celui d'un scintillomètre à gros cristal. Dans les scintillomètres, c'est la dimension du cristal à scintillations qui est le facteur essentiel de sa sensibilité. Certains cristaux ont plus de 2 pouces de côté et sont dès lors sensibles au moindre changement de l'intensité du rayonnement  $\gamma$ . La détection d'un gisement est d'autant plus aisée que le rapport entre la radioactivité en provenance de ce gisement et celle qui caractérise le « back-ground » est plus élevé. Le scintillomètre enregistre avec une grande précision les variations du « back-ground », on constate qu'à l'approche d'un point singulier, le « back-ground » se relève progressivement jusqu'à atteindre une valeur de l'ordre de 2 à 3 fois celle du « back-ground » mesuré à plus grande distance du point singulier. Dans une zone étendue autour du point radioactif, le rapport de la radioactivité anormale à la radioactivité ambiante est donc peu élevé et le point singulier ne peut être localisé avec une aussi grande précision qu'au moyen du compteur de Geiger ordinaire.

Les appareils les plus sensibles, tels que les scintillomètres à gros cristal, sont donc plus spécialement destinés à la recherche des indices dans des régions étendues. Les détails d'un gisement seront mieux révélés par une prospection systématique avec un compteur de Geiger ordinaire, pour lequel le rapport entre la radioactivité mesurée et le « back-ground » sera toujours élevé lorsqu'on s'approche du gîte.

Les compteurs à scintillations n'enregistrent pratiquement que le rayonnement  $\gamma$ , les compteurs de Geiger par contre, sont également influencés par l'émission de particules  $\beta$ . Les particules  $\beta$  correspondent à des électrons libérés dans le milieu ambiant ; leur émission n'est pas nécessairement liée à une manifestation de radioactivité. L'importance du rayonnement  $\beta$  peut être diminuée en interposant

un écran métallique entre l'objet radioactif et le tube de Geiger. Le faible pouvoir de pénétration des particules  $\beta$  ne leur permet pas de traverser cet obstacle. Les rayons  $\gamma$  ne sont pas arrêtés par cet écran, mais la sensibilité de l'appareil s'en trouve diminuée par la déviation de certains rayons  $\gamma$ . La diminution de la sensibilité est toutefois proportionnelle à l'intensité de la source de rayonnement mesurée ; on obtient dès lors une mesure plus précise en éliminant le rayonnement  $\beta$ . Les mesures faites à l'approche d'un gisement s'effectuent sans en éliminer les rayons  $\beta$ , c'est-à-dire en maintenant ouverte la fenêtre ménagée dans l'enveloppe métallique du tube de Geiger. Dans ce cas, en effet, la précision de la mesure n'est pas recherchée.

Les compteurs à scintillations et de Geiger sont le plus souvent équipés d'un dispositif de calibrage, qui permet de stabiliser le champ électrique au fur et à mesure de l'épuisement des sources d'énergie qui alimentent ce champ. Dans ce but, des résistances réglables sont interposées dans les circuits d'alimentation pour compenser les variations de puissance. Le réglage de ces résistances s'opère en disposant un témoin radioactif calibré à une distance déterminée de l'appareil. Disposé dans des conditions identiques à celles réalisées au moment du tarage, le compteur de Geiger permet dès lors de déterminer dans certains cas une valeur approchée de la teneur en uranium d'un échantillon. Certains constructeurs de compteurs ont directement gradué l'échelle de mesure en pour cents de  $U_3O_8$ . De telles déterminations de teneurs sont cependant généralement aberrantes. La contamination des compteurs est une première source d'erreurs. Il est fréquent que des poussières radioactives se logent dans des joints du boîtier. De plus, certains verres peuvent acquérir une radioactivité temporaire.

Le mode de désintégration de l'uranium passe successivement par les stades d'émissions de particules  $\alpha$ ,  $\beta$  et finalement  $\gamma$ . L'intensité du rayonnement  $\gamma$  ne peut constituer une caractéristique absolue de la teneur en uranium contenue dans un minéral. On constate effectivement que certains minéraux radioactifs de néoformation émettent uniquement des rayons  $\alpha$ .

Dans ce dernier cas, on procède à un comptage de rayons  $\alpha$  par l'autoradiographie de lames minces des roches radioactives renfermant ces minéraux. Enfin, la présence d'électrons ( $\beta$ ) dans le champ du compteur de Geiger donne toujours lieu à une émission de particules  $\gamma$ , puisque ceux-ci résultent également de la neutralisation des électrons de signes contraires. Il en résulte une faible radioactivité qui est noyée dans le « back-ground » et dont on ne doit pas nécessairement rechercher l'origine dans la présence de minéraux radioactifs.

Ces considérations mettent en évidence que les compteurs de Geiger et les scintillomètres de divers

types ne sont nullement des appareils interchangeables dans toutes les conditions d'utilisation. Par ailleurs, le recours à des laboratoires de radioactivité, où l'on peut discerner les divers types de rayonnement et en établir l'origine, est la seule voie qui permet d'obtenir une détermination précise de la teneur et de la composition des minéraux radioactifs. La spectographie X permet d'apporter une solution rapide à ce problème.

## 6. Méthodes de prospection.

Depuis que la prospection de l'uranium a été organisée sur des bases plus scientifiques que les premières recherches de la prospection publique, la rationalisation des méthodes de prospection est à l'origine de très importantes découvertes. A plusieurs reprises, les géologues spécialisés dans la recherche de l'uranium se sont réunis pour échanger les informations recueillies dans toutes les provinces uranifères du monde. Des cours consacrés à la prospection de l'uranium figurent désormais au programme des universités. Les principes de la prospection de l'uranium ont été fixés dans leurs grandes lignes. Les stades successifs qui permettent l'approche des gisements sont dans l'ordre : la prospection volante ou stratégique, la prospection semi-systématique et la prospection systématique (ou tactique).

Dans les régions nouvelles à prospecter, l'avion et le véhicule « tous terrains » sont devenus les auxiliaires indispensables du prospecteur. Les prospections volantes pratiquées à cette échelle constituent une première tentative en vue de localiser les zones favorables. Les prospections semi-systématiques et systématiques ne sont entreprises qu'en fonction des résultats obtenus lors de la prospection volante, ou par suite de découvertes fortuites. La prospection systématique est la dernière étape de la recherche, elle vise à préciser l'extension d'une zone à radioactivité anormale où, sur une étendue limitée, on peut suspecter la présence d'uranium.

### a) Prospection volante.

Cette prospection a pour but d'orienter les recherches dans des zones étendues. Les moyens utilisés diffèrent d'après la morphologie des régions prospectées. La prospection aérienne est adoptée au-dessus d'étendues sans relief appréciable. Elle est le plus souvent exécutée par des firmes dont la spécialisation essentielle réside dans la disposition d'avions adaptés au vol à basse altitude. La radioactivité est enregistrée d'une manière continue au moyen de dispositifs du même type que ceux utilisés pour les prospections autoportées, mais dont les scintillomètres sont très sensibles. En région montagneuse, la prospection terrestre est préférable à la prospection aérienne ; en effet, l'incidence de la variation de hauteur du survol aérien est prépondérante et ces

variations sont inévitables. L'interprétation des résultats radiométriques, basée sur les variations de la radioactivité au sol, n'a dès lors plus aucune signification.

La prospection terrestre élimine ces inconvénients en relevant la radioactivité au niveau immédiat des sources d'émission de rayons  $\gamma$ . On utilise des véhicules tous terrains adoptés au transport de scintillomètres. Les cristaux de scintillation sont disposés à l'extérieur et, de préférence, à l'avant des véhicules. Les scintillomètres sont alimentés par des batteries à longue durée d'utilisation, dont l'autonomie est de l'ordre de plusieurs centaines de kilomètres par jour et de plusieurs milliers de kilomètres par mois. Le couple de torsion du compteur de radioactivité est transmis à un dispositif d'enregistrement, continu sur diagramme. La vitesse de déroulement du diagramme est réglée selon la vitesse de croisière du véhicule.

Au départ de stations où l'on procède périodiquement au tarage des appareils, des mesures sont relevées sur toute l'étendue du réseau de routes traversant la région. Le report sur le diagramme de points topographiques est indispensable lorsque l'itinéraire prospecté ne comporte pratiquement aucun point d'arrêt, sur une distance de plusieurs dizaines de kilomètres. A la fin de la journée, le diagramme d'enregistrement est immédiatement confié à un opérateur, qui reporte sur une carte topographique les zones à radioactivité anormale.

Cette méthode de levé rapide, qui procède par des enregistrements continus de la radioactivité, permet l'élaboration d'une carte radiométrique à l'usage du géologue ; son utilité est encore très relative pour une prospection. Des renseignements plus complets peuvent être obtenus par une méthode qui comporte des enregistrements discontinus. Dans ce but, le dispositif de mesure est complété par un signal d'alarme lequel fonctionne dès que la radioactivité dépasse une valeur conventionnelle. Les opérateurs peuvent ainsi s'approcher des affleurements avec des compteurs de Geiger, moins sensibles, et déterminer directement l'origine de la radioactivité détectée au passage du scintillomètre autoporté.

Le diagramme d'enregistrement permet de déterminer une valeur moyenne du « back-ground » ; toute radioactivité anormale est marquée par un sommet dépassant le niveau du « back-ground ». L'amplitude des sommets par rapport au « back-ground » est, en principe, fonction de la radioactivité des roches et du terrain explorés. Cependant, le niveau absolu de radioactivité enregistré (y compris la radioactivité ambiante) a également une importance, puisque l'on sait que cette dernière est anormalement élevée dans les zones où des rayons  $\gamma$  sont émis par des sources localisées. En régions montagneuses, certains sommets du diagramme ne correspondent qu'à une déviation mécanique brusque de

l'aiguille dans un virage en épingle à cheveux. Ce couple est cependant rapidement compensé par un ressort, et l'aiguille retombe immédiatement à sa valeur initiale. Une déviation de l'aiguille est par contre toujours progressive lorsqu'elle résulte d'une variation de la radioactivité ; elle s'étale sur une section plus large du diagramme. Cette progressivité s'explique par l'extension du faisceau de radioactivité qui est centré sur l'objet radioactif, faisceau que l'on recoupe suivant un angle très large lorsque l'objet se trouve dans la tranchée de la route. Enfin, une radioactivité anormale ne se manifeste en général que dans des zones bien délimitées, où le « back-ground » est élevé ; il est cependant difficile de repérer sur le terrain l'emplacement exact de tous les points radioactifs correspondant aux sommets du diagramme.

Les enregistrements sont reproduits sur des rouleaux de plusieurs mètres de longueur qui indiquent toutes les variations de l'aiguille du scintillomètre. On peut distinguer plusieurs niveaux de radioactivité. Les niveaux inférieurs se mesurent par des valeurs de 0,01 à 0,05 milliroentgen par heure et de 0,05 à 0,10 mr/h, limites dans lesquelles varie le « back-ground ». Des enregistrements de 0,10 à 0,50 mr/h correspondent à des déviations appréciables de l'aiguille du scintillomètre dans sa sensibilité la plus forte, qui est celle la plus fréquemment utilisée. Enfin, des sommets de radioactivité de plus 0,50 mr/h indiquent des déviations très importantes de l'aiguille. Les deux dernières séries de lectures et surtout la dernière sont les indices certains de l'existence de sources à radioactivité anormale. Les zones dans lesquelles se situent ces derniers, doivent être retenues en vue d'un examen complémentaire plus précis.

Les statistiques montrent que, même dans des provinces uranifères ou thorianifères, des lectures de plus de 0,50 mr/h sont exceptionnelles. Lorsque de telles valeurs sont relevées, leur fréquence peut être l'indice de la radioactivité régionale élevée que présentent certaines formations géologiques, recoupées dans les tranchées des routes prospectées.

#### b) *Prospection semi-systématique.*

Cette prospection est entreprise dans des zones d'extension limitée où l'on a décelé une radioactivité anormale. Son but est, dans ce cas, de préciser l'origine des anomalies de la radioactivité. Dans certains cas, la prospection semi-systématique vise à confirmer des découvertes minéralogiques lorsque des échantillons radioactifs ont été trouvés dans les tailings d'anciennes exploitations minières ou lorsqu'on ignore l'emplacement exact des échantillons recueillis par des chercheurs non initiés.

Les types de compteurs de Geiger utilisés sont les plus sensibles ; l'approche des échantillons uranifères dans des cavités naturelles des roches est encore

favorisée par l'adaptation au Geiger d'un tube-sonde. Il faut renoncer pour cette prospection à l'usage de compteurs non transistorisés, qui sont trop pesants et dont la durée d'utilisation est limitée, conditions qui rendent une prospection pédestre fort pénible.

A défaut d'une carte aérophotogrammétrique, les mesures de radioactivité doivent être immédiatement repérées sur une carte topographique précise. Les mesures de radioactivité doivent se faire à des intervalles qui ne dépassent généralement pas 10 m suivant les lignes de crêtes et les thalwegs, où des formations géologiques sont exposées. Les stations de mesure doivent encore être rapprochées davantage lorsqu'on opère dans des tranchées de routes où affleurent des formations géologiques très redressées et fracturées.

La valeur du « back-ground » est dans ces conditions fort variable et il est généralement impossible de compenser ces variations par des mesures effectuées en circuit fermé. L'influence du « back-ground » doit donc être éliminée systématiquement par des déterminations répétées en dehors des zones d'affleurement ou par l'établissement d'une valeur moyenne du « back-ground » pour l'ensemble de la région explorée.

La disposition des points singuliers découverts lors de la prospection semi-systématique intéresse en premier lieu le géologue. Il établira des corrélations éventuelles entre les anomalies de la radioactivité et les structures géologiques du pays. Il décidera de la nécessité de procéder à un levé radiométrique plus précis dans certaines zones ou de passer directement à un levé systématique autour d'un point bien défini.

Cette méthode de recherche est un compromis entre le plus ancien processus de prospection en application lors de la prospection publique et une tentative de systématisation faite pour éviter les tâtonnements autour d'anomalies de radioactivité souvent aberrantes, qui furent rencontrées par les prospecteurs imparfaitement initiés à l'emploi des compteurs de radioactivité. La systématisation des mesures en permet la répétition et leur fréquence plus grande élimine d'office les erreurs d'interprétation sur des points isolés.

#### c) *Prospection systématique.*

Cette prospection se développe autour d'un point singulier où l'on a constaté une élévation appréciable du taux de la radioactivité en provenance de roches ou des terres de couverture. Le compteur de Geiger ordinaire est utilisé de préférence à des appareils plus sensibles parce qu'il permet une détermination plus précise des limites des zones minéralisées.

La radioactivité doit être mesurée avec grande précision aux sommets d'un réseau maillé, matériali-

sé sur le terrain par des repères disposés à des intervalles mesurés avec précision par un topographe. L'écartement des mailles du réseau primaire peut être de l'ordre de 10 à 100 m, le resserrement des mailles dépend de l'importance de la radioactivité constatée. Si, dans certaines mailles, une élévation de la radioactivité en démontre l'utilité, un réseau secondaire peut être tracé dans les limites du premier. L'orientation du réseau est telle que l'on recoupe le plus fréquemment les zones à radioactivité anormale ; le tracé d'un réseau secondaire peut être ainsi totalement différent du réseau primaire. A chacun des sommets d'un réseau, le compteur de Geiger est disposé dans des conditions identiques par rapport au sol. La durée d'une mesure doit être prolongée sur une période de plusieurs minutes, pendant laquelle l'opérateur enregistre le nombre d'impulsions reçues et détermine ainsi la valeur moyenne de la radioactivité par unité de temps.

Dans les zones minéralisées, la présence de radon exerce une influence sur les variations du « back-ground ». Son incidence sur la radioactivité mesurée est variable dans le temps et dans l'espace. L'une et l'autre de ces variations doivent être compensées par une répétition des mesures en un certain nombre de points de référence du réseau fondamental.

Les valeurs de radioactivité mesurées sont finalement reportées sur une carte topographique et les points à radioactivité équivalente sont reliés par des courbes isorades. Celles-ci permettent de préciser la direction du gradient de radioactivité. Si ce gradient est élevé dans une direction privilégiée, on peut se trouver en présence d'un gisement, mais son exploitabilité devra encore être prouvée par les résultats d'une expertise géologique.

### 7. *Expertise minière des gisements.*

Il y a 10 à 15 ans, la découverte de minéraux d'uranium dans une géode pouvait représenter une découverte économiquement appréciable. De nos jours, même des gisements filoniens de pechblende sont devenus marginaux. L'évolution du marché des minerais d'uranium a rendu indispensable une rationalisation des méthodes de prospection. Toute prospection est désormais précédée d'une enquête d'orientation destinée à fixer le choix de la méthode de prospection et à établir son prix de revient.

La prospection de routine, radiométrique ou géochimique, n'a lieu que si les résultats de l'enquête d'orientation ont été satisfaisants.

Enfin, l'interprétation des résultats obtenus est faite sur la base de tous les renseignements existants. Parmi ces derniers, l'étude de la paragenèse minérale, des processus d'altération, de la métallogénie du gîte et de la répartition zonale des minerais apporte des données importantes qui dispensent très souvent d'entreprendre des recherches systématiques, étendues et coûteuses.

Cependant malgré les progrès réalisés dans ces divers domaines, l'incidence du hasard ne peut être complètement exclue. Récemment à Franceville dans l'ex-Congo Français, un gisement étendu d'autunite fut découvert à quelques mètres sous un gisement de manganèse. On sait, par ailleurs, que plusieurs gîtes d'uranium doivent leur découverte à la curiosité de collectionneurs de minéraux. Les minerais d'uranium présentent en effet des couleurs typiques : jaune, vert, orange, etc. que l'on remarque forcément avant même de songer à utiliser un compteur de Geiger.

Lorsque la recherche de minerais d'uranium a été poussée au stade de la découverte d'un gîte ou d'un affleurement dans lequel on a reconnu la présence de composés d'uranium, on entre dans un domaine qui requiert l'intervention des géologues. Le compteur de Geiger, pas plus que le scintillomètre, ne sont dès lors de très grande utilité, car, dans les mines, les indications radiométriques sont généralement brouillées par la présence du radon. Ce gaz est une émanation du radium, l'un des produits de désintégration de l'uranium. La radioactivité du radon est si considérable qu'elle se détecte à grande distance du gisement d'uranium. Au voisinage du gîte, le radon est dispersé dans une zone étendue, il se répand dans les galeries d'exploitation où il est chassé par la ventilation. A la surface du sol, le radon se dégage des cassures profondes, notamment au voisinage de certaines sources thermales dans les régions uranifères. Ce gaz est chassé par le vent le long des versants des collines et, lorsque la pression atmosphérique est élevée, il ne s'élève que lentement dans l'atmosphère.

L'expertise minière procède par un échantillonnage systématique des filons, des amas ou des concentrations minéralisées recoupées par des galeries ou par des sondages. La localisation peut être aidée par la fluorescence de la plupart des minéraux d'uranium. A l'exception de la pechblende, un grand nombre d'oxydes d'uranium présentent une fluorescence caractéristique sous la lumière ultra-violette. Il faut procéder à ces essais en l'absence de toute lumière dans la partie visible du spectre. On opère aisément ces déterminations qualitatives dans l'obscurité des galeries minières.

Les déterminations quantitatives de l'uranium dans les échantillons de minerais prélevés sont confiées à des laboratoires spécialisés, qui disposent de spectrographes à réflexion, de fluorimètres, de comptomètres, pour le dosage des divers éléments radioactifs. De tels laboratoires sont annexés aux plus importantes exploitations minières pour le contrôle des teneurs de minerais et de leurs impuretés. Certains appareils constitués de plusieurs tubes de Geiger sont réalisés de manière à intercepter la totalité des rayons  $\gamma$ , provenant de lots d'échantillons du même type. Dans ces conditions, la mesure radio-

métrique permet de déterminer une teneur en  $U_3O_8$  d'une précision suffisante pour les besoins de l'échantillonnage.

Les gisements filoniens sont explorés par des tranchées profondes ou par des sondages. Dans ce type de gisements, on peut souvent dès le début des recherches établir un traçage par galeries en vue d'une exploitation. Les gisements en poches de concentration peuvent s'étendre jusqu'à grande profondeur, leur connaissance impose le creusement de puits de recherches et de galeries à divers niveaux.

Les gîtes sédimentaires imprégnés sont également profonds, leur extension ne peut souvent être reconnue que moyennant des sondages systématiques. Les gîtes en amas diffus ou en géodes n'ont guère donné lieu à des exploitations rentables. Ces gîtes disséminés peuvent toutefois orienter les recherches vers des gisements filoniens plus importants. Les gîtes détritiques secondaires ne contiennent pratiquement jamais d'uranium, ils sont par contre parfois thorianifères et, à ce titre, ils ont déjà été exploités à ciel ouvert.

#### a) Gisements filoniens.

La plupart des mines d'uranium exploitent des gîtes filoniens. Dans beaucoup de ces mines, l'uranium n'a été découvert qu'à l'occasion de l'exploitation d'autres minerais. Il est en effet exceptionnel qu'un filon uranifère soit découvert en affleurement, car l'altération des oxydes d'uranium, même de la pechblende, est rapide et importante. La profondeur de la zone d'altération peut aisément atteindre plusieurs dizaines de mètres dans des régions humides et tropicales. Les minerais secondaires se concentrent à la base de la zone d'altération, leur répartition est conditionnée par la circulation des eaux d'infiltration et par le niveau de la nappe phréatique.

Dans les régions où le relief est juvénile, les rivières profondes peuvent exposer des filons. C'est par une prospection semi-systématique des lits des rivières que l'on y ouvre les recherches. Dans les régions tropicales, il s'impose d'attendre à cette fin les périodes de sécheresse, pendant lesquelles les affleurements en bordure des cours d'eau sont les mieux exposés. La recoupe d'un filon sur les deux rives d'une rivière permet d'établir une composante de la direction de minéralisation. Cette direction peut dès lors constituer la ligne dorsale d'un réseau suivant lequel on effectue une prospection systématique.

Les indices relevés lors d'une prospection systématique ne porteront que rarement sur le gîte primaire, car ce gîte s'accompagne toujours de concentrations secondaires qui sont formées de minéraux à haute radioactivité. Ces concentrations se situent

souvent au niveau de la nappe phréatique ou au sommet du « bed-rock », c'est-à-dire à une profondeur moindre que celle des filons primaires.

#### b) Gisements dérivés de gîtes primaires.

Il faut inclure dans cette catégorie les gisements secondaires dérivés des gisements filoniens voisins, les amas en poches et les gîtes sédimentaires imprégnés. Leur recherche est généralement difficile parce que leur radioactivité peut être complètement masquée par l'épaisseur des formations de couverture.

L'uranium, que l'on trouve au sein des roches primaires sous diverses formes minéralogiques, peut être remanié et se concentre sous forme d'anomalies primaires dans les joints et les vides de roches-mères, spécialement de roches acides où il se trouve originellement et de roches ou de dépôts sédimentaires dans lesquels il se concentre ultérieurement. Les anomalies primaires d'uranium sont mieux repérables par radiométrie parce que l'uranium y est encore accompagné de ses descendants et il reste décelable par l'émission de rayonnements gamma.

Dans la détection des concentrations secondaires d'uranium, la méthode de recherche la plus indiquée est basée sur la géochimie. De très faibles concentrations de sels d'uranium peuvent être décelées dans les eaux et dans les terres de couverture et leur gradient de concentration permet ainsi de remonter rapidement vers le gisement. Les eaux se chargent aisément de composés uranifères solubles, que l'on extrait en les concentrant notamment par une méthode d'absorption, empruntée à la chromatographie. La détermination des teneurs en  $U_3O_8$  est faite également par fluorimétrie. On détermine ainsi la présence de teneurs d'oxyde d'uranium qui peuvent être de l'ordre d'une partie par billion.

L'étude du réseau hydrographique et du mode de drainage est dès lors primordiale dans toute l'étendue de la région prospectée. Les plus fortes microteneurs enregistrées s'étalent assez régulièrement au voisinage du gisement.

Au deuxième stade, un réseau topographique doit être matérialisé sur le terrain au-dessus des zones favorables, dont la location a été faite par l'étude géochimique des eaux. D'après l'extension de cette zone, l'écartement des mailles du réseau peut varier de 10 à 100 m. A chaque nœud du réseau, on prélèvera au moyen d'une tarière, éventuellement à diverses profondeurs, des échantillons de terres, dont on effectue ensuite l'analyse par la voie géochimique. Le tracé des courbes d'iso-teneurs en  $U_3O_8$  joue dans ce cas le même rôle que le tracé des courbes isorades résultant d'une prospection radiométrique. Sauf lorsqu'il s'agit de gisements d'imprégnations dans les formations tabulaires, une telle recherche permet de faire progresser rapidement les tentatives de localisation.

L'altération météorique de l'uranium primaire donne lieu à une oxydation de l'U. tétravalent en U. hexavalent, plus mobile, qui forme des complexes passant facilement en solution. L'uranium, bien qu'isolé, est dès lors décelable chimiquement au cours de ses déplacements. Le dépôt de l'uranium intervient par suite de variations dans les facteurs qui contrôlent l'équilibre entre ions uranyl (hexavalent) et ions uraneux (tétravalent). Dans certains cas, les eaux entraînent l'uranium jusque dans la zone de capillarité au-dessus de la nappe phréatique où il devient décelable par la méthode géochimique. Des concentrations sont ainsi rendues possibles dans les horizons inférieurs des profils pédologiques, même en-dessous de la cuirasse latéritique des régions tropicales.

La géochimie de l'uranium est devenue depuis ces dernières années une méthode très précise qui complète utilement la méthode radiométrique spécialement pour la localisation de gisements secondaires.

### 8. Radioactivité des roches.

La prospection volante par la méthode des enregistrements continus permet le tracé d'une carte radiométrique régionale. Dans l'exposé de cette méthode de prospection, j'ai signalé l'intérêt que de telles cartes peuvent présenter pour le géologue chargé d'établir la carte géologique. A ce point de vue, le scintillomètre apporte des données utiles ; il permet de classer et même parfois de caractériser les roches d'une région d'après leur radioactivité. La radioactivité se manifeste, malgré le couvert végétal qui le plus souvent cache les roches à la vue de l'observateur. Lorsque cette radioactivité est appréciable, on peut suivre sur de grandes distances des formations géologiques, notamment des batholites granitiques, des bancs de roches arénacées ou des formations étendues de laves.

La radioactivité de certaines roches ignées, spécialement de roches acides, est d'origine génétique. Leur altération a provoqué une dispersion considérable des minéraux radioactifs, dans les formations superficielles voisines. Il en résulte une radioactivité uniformément répartie, qui peut permettre le repérage des roches-mères au moyen d'un scintillomètre. Dans cette catégorie de roches, les granites sont souvent nettement radioactifs par suite de la présence de minéraux d'uranium et de thorium. Certains granites d'une genèse particulière, auxquels sont associés des niobo-tantalates et des oxydes de terres rares, ont même parfois été exploités en tant que minerais d'uranium. La plupart des roches basiques sont par contre peu radioactives, il en est de même de roches transformées par métamorphisme, même lorsqu'elles sont d'origine acide.

La radioactivité des roches d'origine détritique est généralement négligeable parce que l'uranium a été

rapidement éliminé des gîtes détritiques originels. Les composés d'uranium sont parmi les moins stables ; ils s'altèrent rapidement et sont entraînés par les eaux vers des gîtes disséminés au sein desquels leur concentration est faible. Dans les régions arides, cette altération est moins rapide, les minéraux uranifères ne s'éliminent que lentement des gîtes superficiels.

Les roches poreuses de toutes natures, depuis les formations métamorphiques altérées jusqu'aux concrétions récentes, sont donc susceptibles de devenir radioactives lorsqu'elles se trouvent dans des provinces uranifères, mais il est généralement impossible de remonter au gîte primaire à partir de gîtes secondaires à faible teneur. La dispersion de l'uranium suit en effet des lois très complexes qu'il n'est possible de découvrir que lorsqu'on connaît la paléogéographie de la région à l'époque de la formation des gîtes secondaires. Les calcaires et les roches de formation analogue ne sont guère radioactifs, sauf lorsque certains niveaux intersticiels peu puissants donnèrent lieu à une concentration de minéraux uranifères. C'est aussi le cas pour certains travertins formés autour de sources thermales, dont les eaux chargées en radon sont souvent radioactives. Ces phénomènes s'observent aussi au voisinage des événements et des bouches volcaniques en communication avec les zones profondes de l'écorce terrestre.

Ces considérations sur la radioactivité des roches ne sont données qu'à titre exemplatif, car cette caractéristique est essentiellement régionale. Réciproquement, on peut déduire, de la présence de roches radioactives, des règles qui peuvent orienter la prospection de minerais d'uranium vers des zones favorables à ce point de vue.

### 9. Protection contre le rayonnement gamma.

On sait que les matières premières mises en œuvre dans les piles atomiques sont isolées par d'importants ouvrages, dont le coût d'installation grève considérablement les frais de premier établissement des centrales nucléaires. Par ailleurs, le rendement des échangeurs de chaleur et d'énergie est fortement limité par l'absolue nécessité d'éviter la contamination des fluides qui rentrent dans les circuits d'utilisation.

Si le danger que présente le rayonnement en provenance des matières premières actives de l'industrie atomique est bien connu, il n'en a pas toujours été de même pour le rayonnement produit par des échantillons minéralogiques contenant de l'uranium. L'attention des géologues et des prospecteurs n'a été attirée que depuis peu de temps sur les conséquences graves qui peuvent résulter pour le corps humain d'une exposition prolongée au rayonnement gamma

en provenance de certains échantillons minéralogiques.

Un géologue Sud-Africain m'avait signalé, il y a plusieurs années déjà, que la présence dans son bureau d'un lot d'échantillons de sables uranifères du Rand, lui avait causé une véritable brûlure à l'endroit où il y avait été exposé pendant une période de quelques semaines à raison de plusieurs heures par jour. Plus récemment au Ruanda, un début de leucémie a été causé chez un prospecteur par un échantillon de pechblende qu'il avait conservé durant plusieurs jours dans les poches de ses vêtements. Outre les accidents superficiels dermatologiques, une action néfaste sur certaines fonctions ou certains organes humains peut aussi résulter d'une exposition prolongée au rayonnement gamma, même s'il est produit par des échantillons de minerais radioactifs.

Récemment, à l'occasion de la mise en vente à des fins réputées thérapeutiques d'échantillons de sables uranifères, le problème s'est posé de déterminer le taux de la radioactivité naturelle qui est susceptible d'être dangereux pour l'homme. Il semble que ce problème n'a pas encore été résolu, mais déjà, certains facteurs, dont la durée de l'exposition au rayonnement, en ont été étudiés. On considère jusqu'à présent, à défaut de données plus précises, que, dans la pratique, un rayonnement  $\gamma$  qui ne dépasse pas en intensité celui causé par le cadran phosphorescent de certaines montres-bracelets, est peu susceptible de provoquer des accidents dermatologiques, quelle que soit la durée de l'exposition au rayonnement. Or, beaucoup d'échantillons minéralogiques, que l'on trouve dans leurs gîtes naturels, présentent une radioactivité qui dépasse ce niveau. La prudence la plus élémentaire impose dès lors d'éviter de prolonger inutilement l'exposition du corps humain à une émission de rayons  $\gamma$  produits par ces échantillons minéralogiques.

Des règles plus précises ont été formulées en ce qui concerne les exploitations minières. La législation française considère qu'il y a lieu de limiter de manière absolue la durée du travail dans les mines souterraines de minerai d'uranium. D'autres pays se sont bornés à limiter d'office le taux de radioactivité tolérable au-delà duquel il y a lieu de faire évacuer les chantiers. Cette dernière mesure subordonne dès lors l'exploitation à l'existence d'une ventilation énergétique susceptible d'éliminer les gaz radioactifs ; elle requiert un contrôle régulier et permanent de ce taux de radioactivité au moyen de compteurs de Geiger.

L'expérience que l'on commence à acquérir dans ce domaine permettra certainement encore de faire progresser la détermination des critères de sécurité.