

Développements récents dans l'exploration de l'uranium

par P.M. Barretto*

Même quand elle est confiée aux mains les plus compétentes et les plus expérimentées, la prospection des minéraux est coûteuse, aléatoire et demande beaucoup de temps. On l'a décrite comme une combinaison d'art et de science: la plupart des projets de prospection ont pour origine des idées générales ainsi que des concepts géologiques, et font appel à de nombreux travaux, effectués en laboratoire comme sur le terrain, qui s'échelonnent du simple examen visuel du sol à l'évaluation détaillée de la rentabilité de l'exploitation.

La prospection de l'uranium présente des caractéristiques analogues, son seul avantage étant la possibilité de déceler à distance l'uranium car celui-ci émet un rayonnement gamma. Les techniques de radiométrie représentent donc la méthode d'exploration la plus utile. Outre les problèmes mentionnés ci-dessus, les pays en développement qui désirent commencer, ou poursuivre, des programmes de prospection d'uranium, se heurtent à des difficultés spécifiques:

- Absence de spécialistes des techniques de laboratoire et de prospection sur le terrain ou difficulté à les recruter en nombre suffisant (manque de main d'œuvre);
- Absence de l'infrastructure administrative et technologique nécessaire à la mise en œuvre des programmes de prospection (manque de connaissances techniques);
- Volume relativement faible des crédits affectés à un programme s'étendant sur plusieurs années (manque de ressources financières).

Compte tenu de ces difficultés, il est très important d'utiliser à bon escient le temps et les ressources disponibles pour un programme de prospection. Il faut donc sélectionner les méthodes optimales qui permettent d'obtenir les renseignements nécessaires, et éviter les chevauchements d'activité entre divers organismes gouvernementaux qui se rencontrent fréquemment en matière de prospection. Dans les pays en développement il est arrivé que trois organismes gouvernementaux différents établissent des relevés géologiques de la même région.

La quantité, la qualité et la disponibilité des données géologiques varient d'un lieu à un autre. De plus, les programmes de prospection peuvent être plus ou moins ambitieux et avoir des objectifs différents. Il est donc difficile d'appliquer une procédure unique. La démarche exposée à la figure 1 pourrait s'appliquer aux régions qui sont prospectées pour la première fois. Appliquée systématiquement, elle permettra d'obtenir à la fois un inventaire des ressources géologiques et une évaluation du potentiel minéral d'une région donnée pour un investissement minimal et une efficacité maximale.

* Membre de la Section des matières nucléaires et de la technologie du cycle du combustible nucléaire, Division du cycle du combustible nucléaire.

Prospection radiométrique

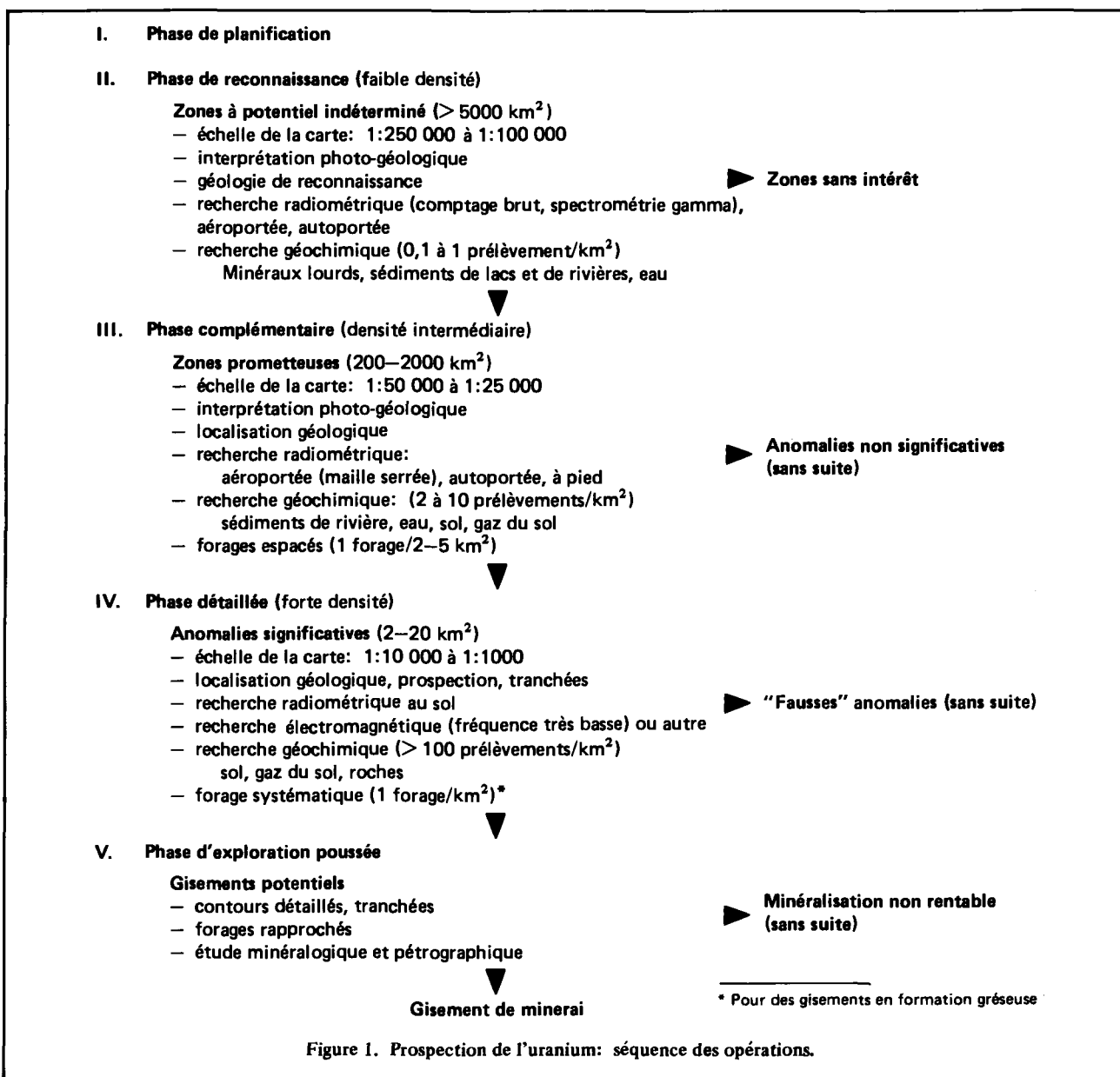
La prospection radiométrique ou radioprospection représente indubitablement la technique de prospection d'uranium la plus utile. En effet, l'utilisation conjointe de la radiométrie aérienne, de l'examen au sol des anomalies détectées et de la diagraphie gamma le long de forages a permis de découvrir une grande partie des ressources connues en uranium. La prospection radiométrique qui permet de mesurer l'activité globale ou une activité spécifique du rayonnement gamma, trouve de nombreuses applications. Il existe donc un grand nombre d'appareils de laboratoire ou de prospection sur le terrain. Les techniques principales sont décrites ci-dessous.

La radioprospection aérienne intervient dans l'évaluation initiale des régions de superficie importante. Des hélicoptères ou avions emportent des détecteurs de rayonnement gamma très sensibles (figure 2). Les anomalies radioactives sont détectées, enregistrées et portées sur des cartes en vue de vérifications ultérieures sur le terrain. La reconnaissance de la zone se fait généralement selon des itinéraires croisés en forme de grille.

Malgré un coût relativement élevé au kilomètre linéaire, la prospection au moyen de spectromètres gamma aéroportés offre un excellent rapport coût-efficacité. Le coût global afférant aux heures de vols, à la cartographie, à l'évaluation, et à la sélection des sites qui feront l'objet d'une prospection complémentaire, soutient favorablement la comparaison avec les coûts des autres méthodes. L'évaluation, bien faite, des données spectrales diminue fortement l'ampleur des vérifications sur le terrain, qui sont nécessaires pour confirmer les résultats de la prospection aérienne et souvent plus coûteuses, au kilomètre carré ou par anomalie, que la prospection aérienne elle-même.

Radioprospection de surface: La poursuite de la prospection s'effectue sur le terrain, là où des anomalies dues à l'uranium ont été constatées, et fait appel à des scintillomètres ou spectromètres portatifs, des appareils de radiocarottage et des émanomètres (appareils de mesure de la teneur en radon).

On utilise les compteurs à scintillation pour mesurer les rayonnements gamma émis par les éléments radioactifs naturels présents dans les roches (U, Th, K). Ces appareils servent essentiellement à détecter les anomalies radiométriques qui peuvent conduire ultérieurement à la découverte de gisements d'uranium. Ils sont caractérisés par une grande efficacité de détection du rayonnement gamma et présentent un taux de comptage élevé et des fluctuations statistiques relativement faibles. On peut ainsi apprécier les petites



variations qui interviennent dans la concentration des éléments radioactifs. Les scintillomètres sont les équipements de terrain les plus fréquemment utilisés dans la prospection de l'uranium sur le terrain; ils sont utilisés dans toutes les phases de la prospection et conjointement avec les techniques géochimiques ou géophysiques.

Les scintillomètres peuvent être montés sur des véhicules pour la prospection radiométrique autoportée. Cette méthode peut s'avérer très commode pour la prospection de l'uranium si le réseau des routes et des pistes est satisfaisant. Elle a permis la découverte de plusieurs gisements.

Le spectromètre de terrain est un appareil radiométrique élaboré qui permet de déterminer l'énergie spécifique des rayonnements gamma, et donc la nature des radionucléides responsables de l'émission. On peut déterminer de cette manière les concentrations équivalentes relatives de U, Th et K. Un spectromètre de

terrain représente un investissement plusieurs fois supérieur à celui d'un scintillomètre. Parmi les inconvénients associés au spectromètre de terrain, on relèvera que: les mesures spectrales prennent plus de temps que le relevé des valeurs globales de comptage; les appareils sont difficiles à entretenir dans les régions isolées; il faut les étalonner fréquemment. La valeur des résultats dépend généralement de la connaissance qu'on a des paramètres géologiques et géochimiques d'une région donnée. Il faut aussi bien pouvoir apprécier une situation pour décider de l'opportunité de recourir à la spectrométrie sur le terrain à une étape donnée de la prospection.

Radiocarottage: L'inspection sur le terrain des anomalies peut conduire à l'arrêt des recherches dans la région, si l'on estime que celle-ci ne présente pas un potentiel uranifère intéressant, ou à la recommandation de procéder à une prospection détaillée. Si l'on décide de passer à cette prospection détaillée, il faudra généralement recueillir des données radiométriques en

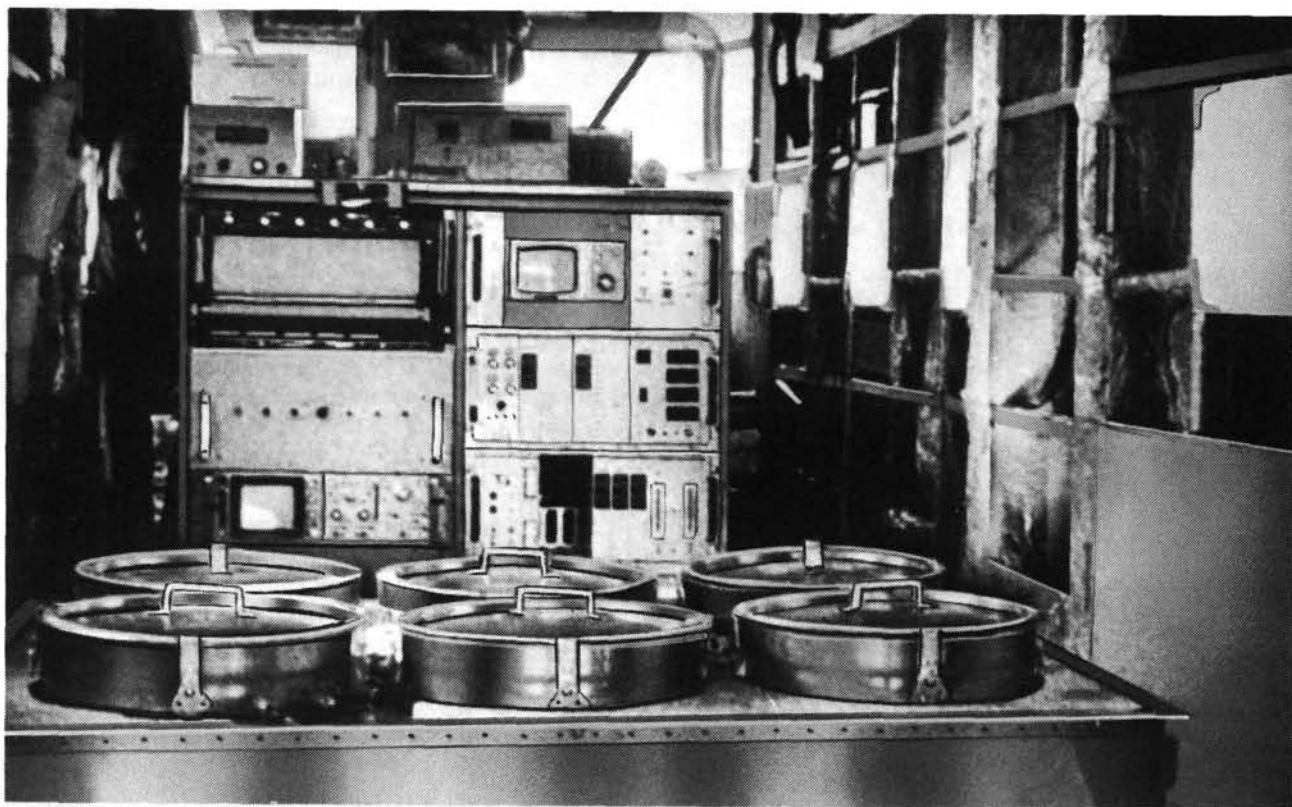


Figure 2. Système de spectrométrie gamma installé à bord d'un avion et comprenant six grands détecteurs à iodure de sodium (visibles au premier plan) et l'électronique associée.

Figure 3. Radiocarottage au Pakistan. L'opérateur se trouve derrière l'appareil d'enregistrement et le treuil manuel servant à descendre la sonde dans le sol; il tient dans les mains la sonde elle-même.

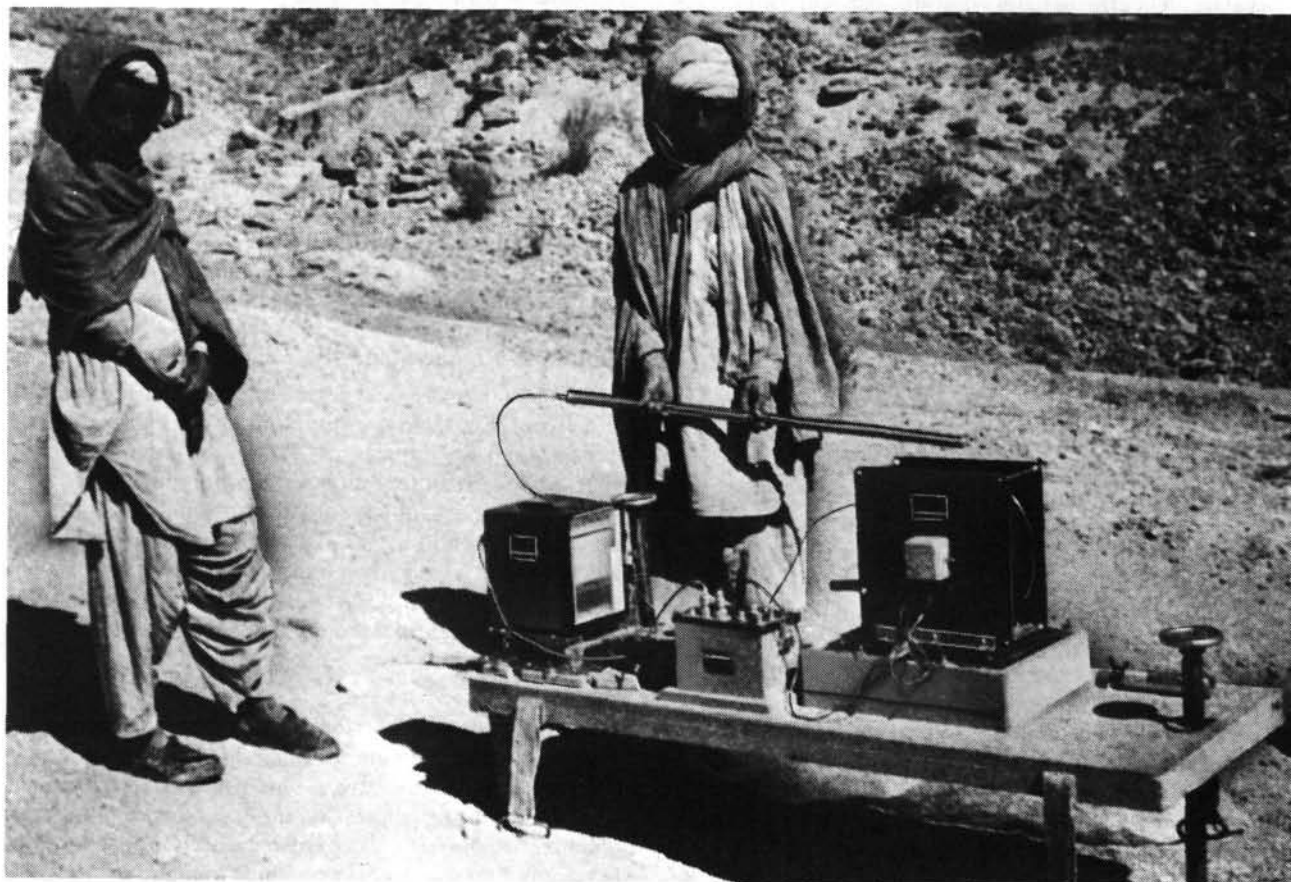




Figure 4. Examen et prélèvement de carottes de sondage au Saskatchewan (Canada). Ce procédé est en général plus coûteux que le radiocarottage.

subsurface. On effectue alors des sondages qui sont radio-carottés et on examine les carottes extraites.

Au cours des prochaines années, les industries privées et d'Etat effectueront des dizaines de millions de mètres de sondages dans le cadre de leurs programmes de prospection de l'uranium. Les sondages représentent couramment 50 à 80% des coûts de prospection de l'uranium, et l'efficacité générale de l'exploration dépend probablement le plus de celle des sondages.

Le radiocarottage consiste à descendre une sonde détectrice de rayonnement gamma dans un forage et à y enregistrer la radioactivité ambiante (figure 3). Cette méthode fournit, de façon rapide et économique, la plupart des données sur le sous-sol dont le géologue prospecteur a besoin; elle permet de procéder à l'échantillonnage et à l'analyse *in situ*, à l'identification lithologique, à la corrélation stratigraphique et, dans le cas de programmes de sondage plus élaborés, elle permet aussi de déterminer des paramètres pétrophysiques comme la densité, la teneur en eau, et d'obtenir divers types de données géochimiques. Le radiocarottage peut souvent réduire très fortement les coûts de forage en permettant d'acquérir les données nécessaires à partir de sondages non carottés, qui sont moins coûteux, ou de forages effectués antérieurement à d'autres fins. En général, le radiocarottage fournit, en moins de temps et à un coût inférieur, des données plus objectives et plus représentatives que celles qui proviennent des carottages classiques, suivis d'un échantillonnage et de l'analyse des carottes extraites. Le

coût d'un radiocarottage destiné à déterminer plusieurs paramètres géophysiques devrait rarement dépasser 10% du coût du forage (figure 4).

Les techniques de forage et de radiocarottage présentent aussi un très grand intérêt pour les phases de l'évaluation, de la mise en valeur et du contrôle des teneurs de la production d'uranium.

En raison de la grande demande de renseignements sur les techniques de radiocarottage, l'AIEA prépare actuellement, à l'usage de ses Etats Membres, un manuel consacré à l'emploi de ces techniques dans la prospection de l'uranium. Il s'agit d'un manuel très complet et à jour qui donnera des instructions pratiques et devrait être distribué vers la fin de 1981.

Détection du radon: Cette technique fait appel à la détection d'un gaz radioactif, le radon, dans le sol, les roches et l'eau. La présence de radon constitue une indication spécifique de l'uranium, alors que le rayonnement gamma naturel peut provenir d'autres éléments de la famille de l'uranium. Les mesures de radon peuvent servir à déceler la présence d'uranium à des profondeurs de 5 à 50 mètres, selon la lithologie, alors qu'une émission de rayonnement gamma peut être masquée par un terrain de recouvrement épais de 0,5 mètre.

On utilise sur le terrain des émanomètres ou détecteurs de radon (figure 5), qui permettent de localiser les concentrations anormales de radon (Rn-222) et de thoron (Rn-220), ainsi que celle de leurs produits de désintégration immédiats. Cette technique permet de différencier le radon du thoron puis d'obtenir des mesures qui sont indépendantes du fond naturel de rayonnement gamma. Il existe plusieurs types d'appareils qui mesurent la concentration du radon. Ils reposent tous sur le principe de la détection des particules alpha qui sont émises quand le radon gazeux (Rn-222) se désintègre en polonium solide (Po-216).

Des innovations ont récemment vu le jour dans ce secteur. Une technique utilise les dommages (traces) causées par le rayonnement alpha à des détecteurs en plastique à l'état solide. Un autre procédé utilise une barrière détectrice à surface en silicium; un autre encore exploite le phénomène du "dépôt actif" provenant de la désintégration des produits du radon accumulés sur un petit disque fin de mylar aluminisé.

L'année dernière, une autre technique est apparue sur le marché. Elle a été mise au point en Afrique du Sud et baptisée *roac* (initiales de "Radon on activated charcoal", c'est-à-dire radon sur charbon de bois activé). Elle est fondée sur l'absorption du radon par du charbon de bois activé. La teneur en radon est alors mesurée à l'aide de n'importe quel détecteur à scintillation existant placé dans un château en plomb. Pour la mise en place des coupelles *roac* sur le terrain, on procède comme dans le cas de la détection des traces alpha.

La méthode de détection des traces alpha et celle du comptage alpha présentent l'avantage, par rapport à l'emploi d'un émanomètre, d'éliminer les variations temporelles du signal que l'on observe dans de nombreux milieux. De plus, il n'est pas nécessaire de disposer sur le terrain d'un matériel électronique compliqué.

L'objectif ultime est de faciliter la sélection des sites les plus prometteurs en vue d'y procéder à des opérations de prospection complémentaire comme le forage ou le creusement de tranchées.

Recherche géochimique

Les techniques géochimiques peuvent être utilisées sur des superficies très variables. On distingue l'exploration à faible densité ou reconnaissance (0,1 à 2 échantillons par kilomètre carré), l'exploration complémentaire à densité intermédiaire (10 à 20 échantillons par kilomètre carré) et l'exploration à forte densité ou détaillée (200 échantillons par kilomètre carré). Des recherches préliminaires doivent indiquer si les méthodes géochimiques sont susceptibles d'être utilisées ou non. Ces recherches doivent également fournir les renseignements nécessaires à la planification et à l'exécution d'une exploration de routine. Avant de lancer un programme systématique de prospection, il faut effectuer des recherches préliminaires (étude de base) pour pouvoir choisir les méthodes à mettre en œuvre.

Des recherches préliminaires doivent être effectuées si possible dans une région présentant une minéralisation d'un type semblable à celui qu'on recherche, et située aussi près que possible de la zone d'exploration. Si ces conditions sont impossibles à réunir, on peut se référer à des études faites sur des régions qui présentent des caractéristiques géologiques et climatiques analogues.

L'exploration à faible densité (échelle 1 : 250 000–1 : 25 000) sert à délimiter les zones les plus prometteuses à l'intérieur d'une région plus vaste; elle ne vise toutefois pas à déterminer des contours précis. L'expérience montre que les prélèvements d'eau et de sédiments (figure 6) dans un réseau hydrographique très vaste se prêtent parfaitement à ce type de prospection. L'étude de base sert à déterminer la maille de prélèvement de façon que la dispersion dans le réseau hydrographique autour d'un gisement d'importance moyenne soit repérée par trois échantillons anormaux au moins.

L'exploration à densité intermédiaire (échelle 1 : 20 000–1 : 50 000) a pour objectif de localiser et de déterminer l'origine des anomalies de surface décelées à l'intérieur des zones propices, délimitées pendant la phase d'exploration à faible densité. A cet effet, on porte la densité de prélèvement à 10–20 échantillons par kilomètre carré. Dans le même temps, on s'efforce d'établir des liens entre l'anomalie et la géologie, la stratigraphie et la tectonique locales. Les prélèvements d'eau et de sédiments doivent être effectués dans tous les cours d'eau de la zone anormale. Là où cela est possible, il faut prélever des eaux de sources et d'infiltration en plus des eaux de puits. Il faut aussi recueillir des données géologiques complémentaires sur les zones anormales mal connues. Si ce type de prospection intermédiaire ne permet que rarement de localiser des minerais uranifères, il permet toutefois de réduire substantiellement le périmètre de la zone prometteuse, d'évaluer son potentiel et de mieux comprendre les origines de l'anomalie géochimique.



Figure 5. Mesure du radon dans le sol.

Il est alors possible de déterminer la méthode la mieux adaptée aux recherches complémentaires: géochimique, radiométrique ou géophysique.

L'exploration à grande densité de prélèvement (1 : 5 000–1 : 500) a pour objectif de localiser les sources présumées d'anomalies et/ou l'étendue des zones minéralisées connues ou voisines et d'évaluer les résultats des études radiométriques. D'une manière générale, cette phase doit permettre de différencier les anomalies liées à une minéralisation dont l'exploitation serait rentable des anomalies dues aux minéralisations non rentables ou à d'autres causes. A cette étape, la prospection géochimique est la méthode privilégiée, en présence notamment d'une altération importante du terrain ou d'une couche de recouvrement stérile (qui rend inefficaces les méthodes radiométriques). L'expérience montre que les prélèvements de sol sont le mieux adaptés à cette étape. On adopte généralement une grille de prélèvement de forme carrée dont la maille est comprise entre 10 à 50 mètres. Il faut alors prendre garde à une contamination éventuelle résultant d'activités minières, de l'utilisation de certains engrais phosphatés ou d'autres activités humaines.

Autres techniques

Il existe d'autres techniques qui, tout en n'étant pas utilisées exclusivement pour la prospection de l'uranium, permettent d'obtenir une meilleure compréhension de la localisation ou de la structure de la minéralisation. On citera:



Figure 6. Prélèvement d'eau dans un puits familial en Turquie pour analyse de la teneur en uranium et radon.

Résistivité de surface et polarisation induite: Ces techniques reposent sur les phénomènes de transmission (conductivité) et de répartition des courants électriques dans le sol. Le choix d'un réseau d'électrodes convenable dépend de nombreux facteurs — notamment la géométrie des cibles et la conductivité et l'épaisseur des couches de recouvrement. Les réseaux dits de Wenner-Schlumberger et dipole-dipole sont les plus fréquemment utilisés. D'une manière générale, les techniques d'interprétation sont beaucoup plus au point pour la polarisation induite que pour la résistivité. Ces techniques électriques ne sont utilisées qu'en phase d'exploration détaillée, après définition d'une cible, sur toute autre zone conductrice et pour déterminer l'épaisseur des strates sédimentaires qui recouvrent des structures ou des gisements connus. Elles peuvent fournir des indications utiles à la planification des programmes de forage.

Téledétection: Les images photographiques prises par satellite ou avion fournissent des données de réflectance multispectrale qui peuvent faciliter la localisation très rapide de zones décolorées, éventuellement altérées, dans une vaste région. Le traitement informatisé de l'image rend ces zones bien plus distinctes qu'elles ne le sont sur des photographies en noir et blanc, voire en couleur. Certaines études montrent que les bandes spectrales des images prises par les satellites *Landsat* ne sont pas optimales pour la reconnaissance de certaines différences subtiles qu'on utilise dans la prospection de l'uranium. Toutefois, après un traitement informatisé, les données fournies par les satellites *Landsat* ont fait ressortir distinctement les zones d'altération rougeâtres, caractéristique qui servait autrefois à orienter la prospection dans les zones uranifères aux Etats-Unis. Ces images font apparaître des linéaments correspondant peut-être à des structures qui, localement, auraient pu influencer la formation d'un gîte uranifère.

En outre, les images thermiques aux infra-rouges peuvent, dans certaines conditions, faciliter considérablement la détection et la localisation des cibles pour la prospection de l'uranium (par exemple, des chenaux remplis de conglomérats dans des formations). Les techniques de télé-détection ne constituent qu'une méthode indirecte de prospection de l'uranium; on les utilise seulement pour recueillir des données géologiques et tectoniques à l'échelle régionale. A ce titre, elles n'interviennent que dans les phases d'exploration préliminaire et de sélection des zones de prospection.

Techniques nouvelles: Un petit nombre de techniques prometteuses sont actuellement à l'étude, bien qu'elles n'aient pas encore été utilisées à une échelle appréciable; certaines d'entre elles n'ont même pas encore atteint le stade expérimental. Il s'agit de l'utilisation de la chaleur radiogénique, du magnétisme rémanent, des mesures d'hélium et du plomb radiogénique. Le groupe mixte d'experts AEN/AIEA de la prospection de l'uranium étudie certaines de ces techniques.

Etudes et recherches

Les méthodes et le matériel décrits ci-dessus sont le fruit d'un effort important d'étude et de recherche. L'Agence s'intéresse à ces travaux d'étude et de recherche dans la mesure où ils permettent, par une amélioration des techniques et des équipements, d'accroître le rythme des découvertes d'uranium. C'est pourquoi elle a créé en 1976 avec l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire un groupe commun chargé d'examiner l'état d'avancement des activités d'étude et de recherche en matière de prospection de l'uranium. Ce groupe a défini plusieurs domaines dans lesquels un effort international coordonné pourrait contribuer à améliorer notablement les techniques existantes et à mettre au point des techniques nouvelles. Depuis lors, les pays membres ont coordonné leur action pour établir des projets internationaux dans huit domaines d'intérêt.

La diffusion de l'information résultant des études entreprises dans le cadre de ces projets est un élément vital de cet effort. Ainsi, un bulletin d'information est établi et envoyé aux industries de l'uranium et aux organismes intéressés par la prospection de l'uranium. Ce bulletin a pour objet principal de faire connaître, environ deux fois par an, les progrès réalisés dans les différents projets d'étude et de recherche qui sont coordonnés par le groupe d'experts. Il contient des rapports d'avancement des travaux, examine les études particulières entreprises par les différents groupes de travail, présente les activités projetées et donne des renseignements relatifs aux réunions et colloques pertinents. Toutefois, le bulletin pourrait à l'avenir contenir aussi de brèves annotations, sans caractère officiel, sur des activités d'étude et de recherche connexes, donc autres que celles qui font l'objet des projets coordonnés, en plus des commentaires sur les programmes actuels et des suggestions relatives aux activités futures d'étude et de recherche et développement. Les pays ou organisations qui désirent recevoir le bulletin d'information peuvent écrire à l'Agence à cet égard. Un colloque où seront présentés et discutés les résultats des activités d'étude et de recherche est prévu du 31 mai au 3 juin 1982 à Paris.