

Les techniques nucléaires dans la prospection, l'extraction et le traitement des minéraux

Les activités de l'AIEA dans certaines applications

par Rolf J. Rosenberg et Jacques Guizerix

Les matières premières minérales sont indispensables pour la production d'énergie et pour les industries manufacturières. Leur coût ne représente pas forcément une partie très importante du prix de revient du produit final. Cependant, dans les deux secteurs il est essentiel que les matières premières soient disponibles. Celles des pays en développement servent à deux fins: elles sont une source directe de revenus et une base naturelle pour la création d'une industrie manufacturière nationale.

Les matières premières minérales ont en commun qu'elles ne sont pas renouvelables. Maintenant déjà, alors que la consommation n'atteint un niveau élevé que dans une petite partie du monde, nous pouvons constater que certaines sont en voie d'épuisement. Pour en assurer la disponibilité dans l'avenir, il faut mettre au point des méthodes de prospection et d'extraction plus performantes et moins coûteuses. Il faut aussi des méthodes de production moins gourmandes en énergie et en matières premières. Les déchets doivent être recyclés.

Les techniques nucléaires d'analyse peuvent beaucoup améliorer la prospection, l'extraction et le traitement des matières premières parce qu'elles permettent une économie d'énergie et de matières premières. Elles peuvent ainsi contribuer aux économies nationales et aux programmes de développement. Elles ont l'avantage d'agir rapidement, sur un seul élément ou sur plusieurs, d'être faciles à utiliser et surtout de pouvoir être mises en œuvre dans des conditions qui excluent les autres techniques — par exemple, sous fortes contraintes thermiques ou dans des milieux poussiéreux ou dangereux, ou encore lorsque les mesures doivent se faire à travers les parois de réservoirs. En outre, elles peuvent saisir la totalité ou la majeure partie de la séquence des procédés, de sorte que leurs résultats sont plus représentatifs que ceux des analyses portant sur des échantillons isolés. Il y a plus: leur réponse est pratiquement instantanée, d'où la possibilité de les exploiter pour la surveillance en direct des opérations.

Recherches géologiques fondamentales

Toute prospection minière repose sur la connaissance globale des phénomènes géologiques et des conditions géologiques du site étudié. Les techniques nucléaires sont particulièrement intéressantes pour déterminer l'âge et la répartition des éléments de la roche étudiée.

M. Guizerix est chef de la Section des applications industrielles et de la chimie de la Division des sciences physiques et chimiques (AIEA); M. Rosenberg est membre de cette section.

L'analyse par activation neutronique est très employée en recherche géologique fondamentale. Pour de nombreux éléments elle est une des méthodes les plus précises. Elle permet d'analyser des échantillons très rares, même petits, tels les échantillons de minéraux lunaires ou de minéraux séparés. En général l'analyse par activation neutronique est exacte, ne détruit pas l'échantillon, peut s'appliquer à plusieurs éléments et est facilement automatisable.

Avec l'appareillage approprié, elle permet de déterminer plus de 40 éléments dans un même échantillon (échantillons de minéraux lunaires et petits échantillons de minéraux, notamment). En ce qui concerne les roches ordinaires, l'analyse par activation neutronique (contrairement aux techniques non nucléaires) convient très bien pour détecter les halogènes, l'antimoine, les terres rares, l'or, les éléments du groupe du platine, l'uranium et le thorium.

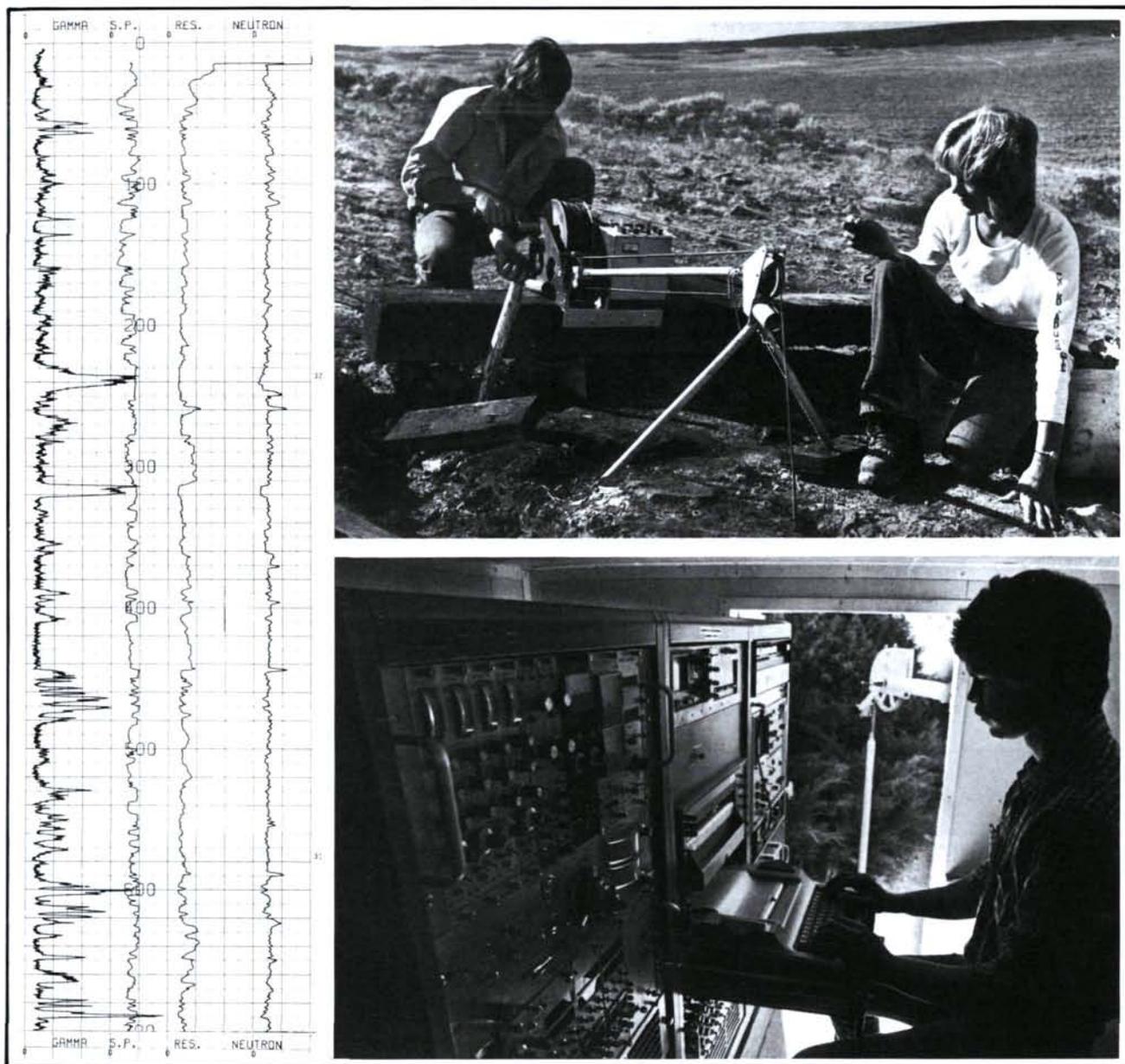
Prospection géochimique

La composition chimique des sédiments organiques et minéraux, des plantes et des eaux peut être représentative de celle des roches sous-jacentes. Quelques types de sédiments se trouvant plus ou moins éloignés de leur origine peuvent avoir une composition chimique qui rappelle celle des roches se trouvant sur leur parcours. Ainsi, la composition chimique des sédiments et des eaux peut servir à localiser une minéralisation d'un intérêt économique. Comme la plupart des éléments se trouvent à des concentrations de l'ordre de quelques parties par million, on a besoin de méthodes précises d'analyse.

En ce qui concerne la composition géochimique, l'analyse par activation neutronique sert aussi dans plusieurs pays pour l'or, les métaux de la famille du platine et, dans certain cas, l'uranium. On a fréquemment recours à des méthodes fortement automatisées, ce qui rend l'analyse peu coûteuse. Quelques pays, dont le Canada, les Etats-Unis, la Finlande et le Royaume-Uni, possèdent des laboratoires d'analyse par activation neutronique où passent chaque année plusieurs dizaines de milliers d'échantillons géologiques.

Prospection géophysique de l'uranium

L'uranium est un mélange d'isotopes radioactifs qui se désintègrent en une série de produits de filiation, lesquels sont radioactifs et peuvent servir à détecter la présence d'uranium. La première méthode consiste à



Relevés et matériels de radiocarottage à rétrodiffusion gamma et neutronique.

mesurer directement la radioactivité gamma des descendants de l'uranium (plus particulièrement le bismuth 214). Il suffit de mesurer le niveau du rayonnement ambiant total au-dessus du sol ou l'activité totale d'une surface rocheuse ou de blocs détachés à l'aide d'un compteur gamma portable. On peut aussi mesurer le rayonnement gamma à partir de véhicules ou d'aéronefs.

Une autre méthode consiste à mesurer les isotopes du radon, qui sont des produits de désintégration de l'uranium. Le radon est un gaz inerte très mobile qui s'échappe de la roche par les fissures et que l'on peut mesurer au sol par son activité alpha.

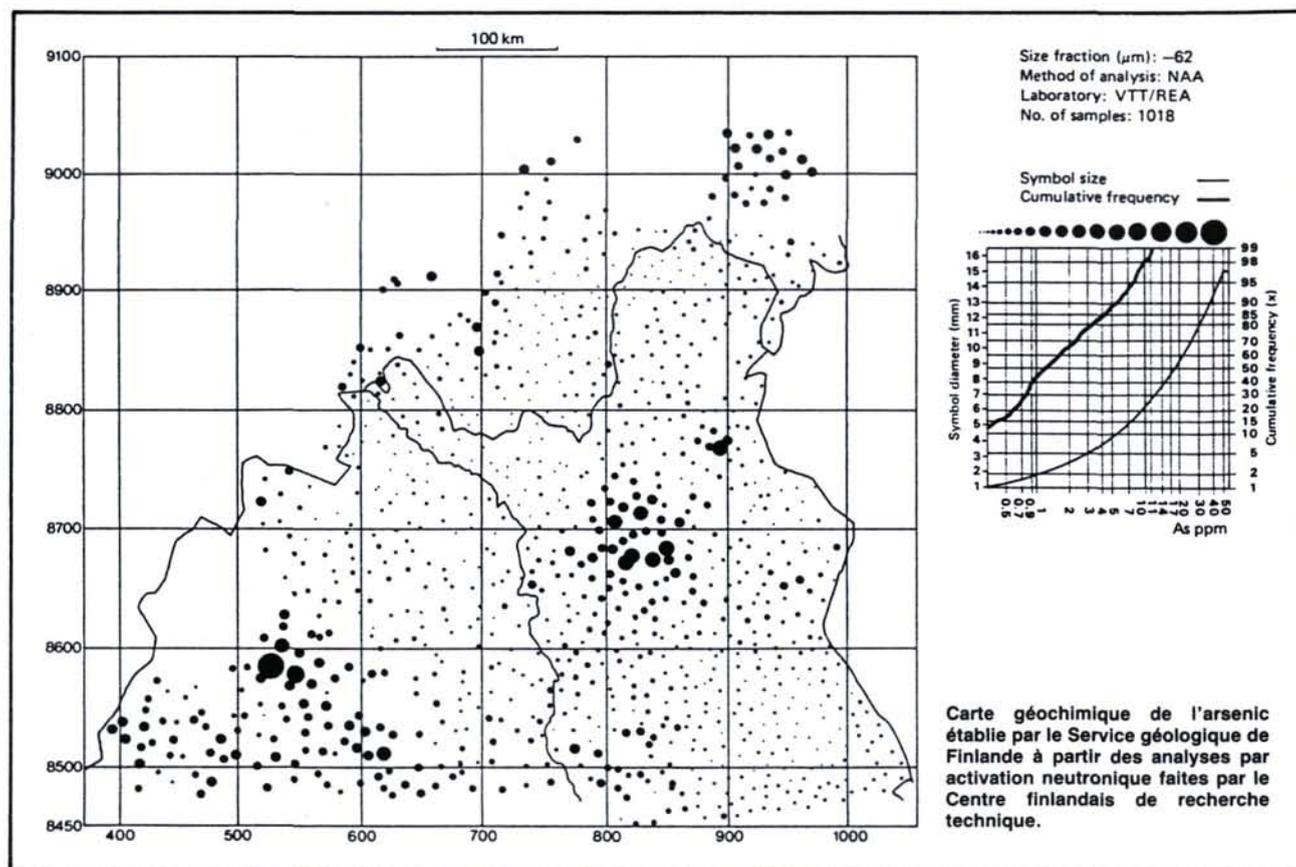
Radiocarottage

Dans la prospection pétrolière et minérale, il faut procéder à des forages pour déterminer si le minerai vaut d'être exploité. Les forages sont toujours coûteux, surtout quand il faut en faire plusieurs milliers (de

un mètre de profondeur). Il s'ensuit que tous les renseignements que peut procurer le trou de sonde doivent être recueillis.

On pourrait envoyer les carottes au laboratoire pour les analyser, mais il est plus expéditif de le faire sur place. Plusieurs analyseurs par fluorescence X à dispersion d'énergie, portatifs ou installés sur des véhicules, ont été conçus à cette fin. Une autre technique très commode consiste à descendre une sonde dans le trou pour faire un relevé de la roche encaissante.

Divers dispositifs de radiocarottage sont d'un usage courant et quelques autres sont à l'étude. La technique la plus simple consiste à enregistrer la radioactivité naturelle (spectrométrie brute ou gamma). On obtient ainsi directement des données sur l'uranium, le thorium et le potassium et, indirectement, sur la composition minérale. Par exemple, on peut avoir des informations sur le charbon. Les veines de charbon ont une concentra-



tion d'éléments radioactifs différente de celle de la roche encaissante.

Les autres sondes nucléaires mesurent l'interaction d'un rayonnement avec la roche encaissante. Elles comprennent une source radioactive et un détecteur protégé contre le rayonnement de la source. Ce rayonnement réagit sur les matières encaissantes, et, de ce fait, ses propriétés sont modifiées et l'on peut tirer des conclusions sur la composition de la roche. L'avantage du rayonnement nucléaire est que, normalement, il est très pénétrant. Ainsi, on peut recueillir des informations dans des trous de sonde, même inondés, sur un grand volume de roche à la fois.

Sondes gamma-gamma. Elles se composent d'une source gamma et d'un ou plusieurs détecteurs gamma à scintillation. L'intensité du rayonnement rétrodiffusé par la roche est fonction de la densité de celle-ci. C'est pourquoi cette technique est communément utilisée pour la prospection du charbon et du pétrole. Le charbon a une densité beaucoup plus faible que la roche encaissante et peut aisément être détecté de cette façon. Le procédé permet aussi de déceler les variations de porosité, ce qui fait qu'elle est intéressante pour localiser les gisements de pétrole et de gaz, ainsi que les formations aquifères. Elle permet aussi de déceler les minerais métalliques de forte densité.

Sondes neutrons-neutrons. Leur principe repose sur l'interaction des neutrons avec la matière. Dans le cas de neutrons rapides incidents, les réactions les plus importantes sont la diffusion et la capture. Il se produit une diffusion élastique lorsque les neutrons de grande vitesse initiale sont progressivement ralentis. Le ralentissement

est très prononcé dans un milieu contenant de l'hydrogène. Ainsi, en mesurant le flux de neutrons thermiques au cours de l'irradiation de la roche par des neutrons rapides, on peut connaître la teneur en hydrogène. Cette méthode de radiocarottage peut aussi servir à la prospection du pétrole, du gaz et de l'eau. Elle est d'ailleurs d'un usage courant dans la prospection du pétrole et du gaz, où l'on utilise communément divers types de sondes neutrons-neutrons.

Dans les forages, l'analyse des éléments peut se faire par fluorescence X et par une technique appelée «analyse par activation/émission gamma de capture». Aucune de ces deux techniques n'est encore très répandue mais on en a trouvé plusieurs applications prometteuses. La technique gamma de capture serait particulièrement intéressante dans la prospection du charbon, car elle permet de déterminer presque tous les constituants du charbon, ce qui signifie que tant la teneur en cendres que le pouvoir calorifique peuvent être évalués avec exactitude. On peut aussi l'appliquer avec de bons résultats à certains métaux, dont le cuivre et l'argent.

Applications minières

Dans l'exploitation minière, les techniques nucléaires servent surtout pour l'uranium, le charbon et le pétrole. Dans le cas de l'uranium, la radioactivité de la roche sert à séparer le minerai et les stériles et à déterminer la qualité du minerai. Dans celui du charbon, il importe de connaître la puissance de la couche de charbon dans les travers-bancs pour ne pas extraire des stériles. Une technique utilisée avec succès se fonde sur l'absorption

du rayonnement gamma de la roche, mais elle ne peut s'appliquer quand la roche mère a une faible radioactivité. Les techniques à rétrodiffusion y ont été substituées mais elles n'ont pas encore donné des résultats très intéressants.

Dans l'extraction du pétrole, on utilise des indicateurs radioactifs pour résoudre divers types de problèmes. Par exemple, lorsque la pression du gisement est insuffisante pour faire monter le pétrole, on injecte divers fluides pour la faire augmenter, en ajoutant un indicateur radioactif dans un des puits. On applique ensuite la pression et on peut alors suivre le transfert de l'indicateur vers les puits voisins et apprécier ainsi les résultats de l'opération.

Traitement des minerais

Le traitement des minerais et la préparation des métaux, du charbon et du pétrole se prêtent à plusieurs applications des techniques nucléaires: systèmes de contrôle, analyse des éléments et radioindicateurs, à divers stades des procédés.

Dans le traitement des minerais, la technique nucléaire la plus fréquemment utilisée est la spectrométrie par fluorescence X, qui permet une analyse en direct des éléments. On trouve des analyseurs par fluorescence X dans le commerce et quelques-uns sont en service. Plusieurs points de la chaîne de traitement peuvent être contrôlés simultanément: d'habitude, au moins la matière première, le produit final et les résidus. Deux systèmes sont généralement utilisés. L'un consiste à insérer les sondes dans les réservoirs ou les tuyaux de la chaîne principale et l'autre à opérer un sondage automatique, les échantillons étant acheminés jusqu'à l'analyseur par des tuyaux. Une seule sonde suffit pour déterminer plusieurs éléments à la fois.

On peut mesurer le niveau des matières dans un réservoir étanche à l'aide de techniques nucléaires, notamment par absorption et par diffusion gamma. La première est plus efficace, mais quand l'accès ne peut se

faire que d'un côté du réservoir ou que le diamètre de celui-ci est trop grand, on peut avoir recours au procédé à rétrodiffusion. Une des applications les plus courantes est la vérification automatique du niveau de remplissage des fours, des réservoirs de stockage et des convoyeurs. Les techniques par absorption gamma conviennent quand la chaleur, la corrosion ou l'état physique de la matière excluent d'autres techniques.

Si le diamètre du dispositif de transport — un tuyau par exemple — est constant, on peut recourir à l'absorption gamma pour obtenir la densité de la matière. Dans les mélanges d'eau et de minerai broyé, le volume de minerai transporté peut être mesuré directement si le débit est connu. On peut aussi placer des sondes spéciales dans les boues pour déterminer la densité. Dans des conditions contrôlées, la densité est proportionnelle à la quantité de minerai, de charbon ou de métal dans le mélange.

Si la densité de la matière est connue, l'absorption gamma peut servir à mesurer le poids. Une application classique est la mesure du débit d'un convoyeur à bandes.

La teneur en eau du charbon se détermine couramment en continu par la technique neutronique mentionnée plus haut, selon le même principe que pour l'eau et le pétrole dans les trous de sonde. En général, les analyses par activation neutronique et par rayons gamma de capture ou différés sont utiles pour la surveillance des opérations pour les mêmes raisons que dans le carottage radiométrique. Le rayonnement nucléaire est très pénétrant et permet d'analyser de grands volumes de matières de forte granulométrie. Malgré leurs avantages, les techniques par activation neutronique ne sont pas très en usage. La raison probable en est que l'on hésite à utiliser des sources radioactives dans les installations industrielles.

Il n'empêche que dans les installations qui produisent ou utilisent du charbon, l'analyse par activation neutronique a la préférence parce que le charbon est une



Etude géochimique et radiométrique en Colombie. Les géologues locaux ont bénéficié d'une formation sur place en participant à cette étude sous la direction d'un expert de l'AIEA. (Photo: M. Tauchid/AIEA)

matrice qui s'y prête très bien. Le carbone et tous les composants de la cendre peuvent être exactement et rapidement déterminés.

Les indicateurs dans le traitement des minerais

Les techniques des indicateurs radioactifs sont très répandues pour l'étude et l'optimisation du traitement des minerais. Il y a à cela plusieurs bonnes raisons. Comme les opérations se font à très grande échelle, les résultats ne sont pas toujours ceux que faisaient augurer les essais à l'échelle pilote. Des améliorations relativement mineures d'un procédé industriel conduisent à de fortes économies et les indicateurs radioactifs offrent des possibilités sans égales d'étudier la marche du procédé.

Entre autres applications, ces techniques servent à étudier le débit, le mélange et le broyage des matières. On peut citer aussi l'étude des réactions physico-chimiques, la séparation du métal et des scories, la détermination du volume des matières traitées dans un réacteur et de l'usure de celui-ci. Lors du contrôle de qualité les techniques des indicateurs radioactifs servent aussi à identifier les inclusions non métalliques dans les métaux.

Les activités de l'AIEA

L'AIEA a une longue tradition dans la promotion de l'utilisation des techniques nucléaires pour l'exploitation des ressources minérales. Elle a organisé plusieurs colloques, conférences, tables rondes, groupes consultatifs et réunions de consultants et elle a publié de nombreux rapports techniques.

Grâce à son programme de coopération technique, elle continue d'apporter son soutien aux pays en développement. Trois domaines ont surtout retenu son attention: la prospection et la mise en valeur des gisements d'uranium, la mise en place de laboratoires utilisant des méthodes nucléaires d'analyse en vue de la réalisation des programmes de prospection des minerais, et l'emploi d'indicateurs dans le traitement des minerais. Ainsi, l'AIEA a assisté la mise au point de l'analyse par activation par des neutrons de réacteur et de l'analyse par activation neutronique à 14 mégavolts, et la création de laboratoires d'analyse par fluorescence X à dispersion d'énergie ainsi que leur

utilisation dans la recherche géologique et la prospection minière. Elle a fourni du matériel et dispensé une formation à l'occasion de cours, de missions d'experts et de bourses de perfectionnement.

En Roumanie, par exemple, l'AIEA aide à mettre au point un matériel de radiocarottage pour la prospection du pétrole à très grande profondeur. Dans plusieurs pays, des projets de prospection et d'exploitation de l'uranium ont déjà été lancés.

Un assez vaste programme de recherche dans ce domaine se réalise sous les auspices de la Division des sciences physiques et chimiques de l'AIEA. En 1986, cette division a mené à terme un programme de recherche coordonnée (PRC) sur les techniques nucléaires d'analyse pour la prospection, l'extraction et le traitement des minerais. Les activités, en cours et en projet, de cette division et d'autres organes de l'AIEA comprennent notamment:

- La première réunion de coordination de la recherche relative à un programme de prospection et de mise en valeur des ressources naturelles, qui se tiendra en novembre 1987 aux Etats-Unis. Ce programme en est à sa deuxième année et comporte cinq contrats et cinq accords passés avec l'Australie, le Canada, la Chine, les Etats-Unis, la Hongrie, le Japon, la Pologne, l'URSS et le Viet Nam.
- Une réunion de groupe consultatif sur les techniques nucléaires d'analyse en continu des éléments dans l'industrie, prévue pour juin 1987 en Finlande.
- Une réunion de consultants sur l'évolution des techniques de radiocarottage pour l'analyse des éléments, qui se tiendra en novembre 1987 aux Etats-Unis.
- La Section des constantes nucléaires de l'AIEA a entrepris une vaste compilation de données relatives aux sections efficaces neutroniques pour la géophysique et les techniques nucléaires d'analyse. Une série de réunions se sont tenues et d'autres sont prévues.
- La Division du cycle du combustible nucléaire a en cours un vaste programme de prospection, d'extraction et de traitement des minerais d'uranium. Treize réunions seront consacrées en 1987 aux techniques de prospection de l'uranium, à la géologie de l'uranium, à l'extraction et au traitement des minerais et aux ressources d'uranium. Plusieurs réunions seront essentiellement consacrées à la rédaction d'un manuel à l'intention des équipes de recherche des pays en développement.

