



## La science et la technologie nucléaires dans les pays en développement: potentiel et perspectives

*Réflexions sur l'énergie nucléaire et ses divers domaines d'application: énergétique, agriculture, médecine, industrie, sciences et autres*

par Noramly bin Muslim

Au cours des trente années qui se sont écoulées depuis la création de l'AIEA, les pays en développement ont exploré virtuellement tous les domaines de la science et de la technologie nucléaires, ce qui a permis un large développement de «l'atome pour la paix» dans le monde entier. Comme il fallait s'y attendre, les progrès ont été accomplis non sans quelques difficultés et plus rapidement dans certains domaines que dans d'autres. De nombreux aspects complexes sont liés à l'exploitation de l'énergie nucléaire à des fins pacifiques. Etant donné le bilan des résultats obtenus, quelles sont les perspectives? Un coup d'œil jeté sur quelques-uns parmi les principaux champs d'application de l'atome où l'AIEA est intervenue, en participant à des projets de coopération technique et à d'autres activités, permettra de mieux voir comment se présente l'avenir.

### Les centrales nucléaires

Si, au cours des dernières décennies, les applications pacifiques des radioisotopes et des rayonnements ont progressé plus rapidement dans les pays en développement que les moyens de production d'énergie nucléaire, les raisons en sont liées sans nul doute aux facteurs «temps» et «argent». L'énergie nucléo-électrique exige des investissements financiers considérables, ainsi qu'une importante infrastructure. En outre, les prévisions à long terme sont peut-être plus nécessaires dans le secteur énergétique que dans beaucoup d'autres domaines. Or, ce genre de prévisions est complexe et difficile, car il lui faut intégrer une politique qui porte aussi sur d'autres sources d'énergie, ainsi qu'un certain nombre de facteurs liés à l'économie

nationale et aux industries d'appui, telle la capacité de garantir le bon fonctionnement du matériel, ou des facteurs extérieurs, tels les prix de l'uranium ou du pétrole. Une erreur dans les prévisions risque d'entraîner des conséquences graves, parce que le temps de réponse des systèmes concernés est long; c'est ainsi qu'il faut en moyenne une dizaine d'années pour qu'un programme nucléo-énergétique commence à prendre forme.

Pour un pays en développement, la première étape importante à franchir consiste à élaborer un plan de développement national solidement étayé et qui bénéficie d'un large appui. Avec ce plan — et uniquement grâce à lui — on pourra assurer la mise en œuvre efficace des ressources humaines et de l'infrastructure industrielle, ce qui ouvrira la porte à toutes les applications non énergétiques. Comme on le relèvera plus bas, ces dernières présentent un intérêt évident dans tous les domaines de l'activité économique, ainsi que sur le plan sanitaire, tout en ouvrant la voie à l'option nucléo-électrique, si les conditions du pays le justifient.

M. Noramly est le Directeur général adjoint de l'AIEA chargé de la coopération technique. Son article est repris d'un exposé prononcé à Athènes lors du Colloque international de l'AIEA sur la signification et l'importance de la recherche nucléaire dans les pays en développement.

Photos ci-dessus et page suivante: En 1977, l'AIEA et la FAO ont organisé conjointement un cours d'un mois sur l'amélioration des végétaux, à l'Institut indien de recherche agronomique de la Nouvelle-Delhi. Vingt spécialistes, notamment ceux de l'Indonésie et du Ghana que l'on voit ici, y ont participé. (Photos: A. Micke/AIEA).

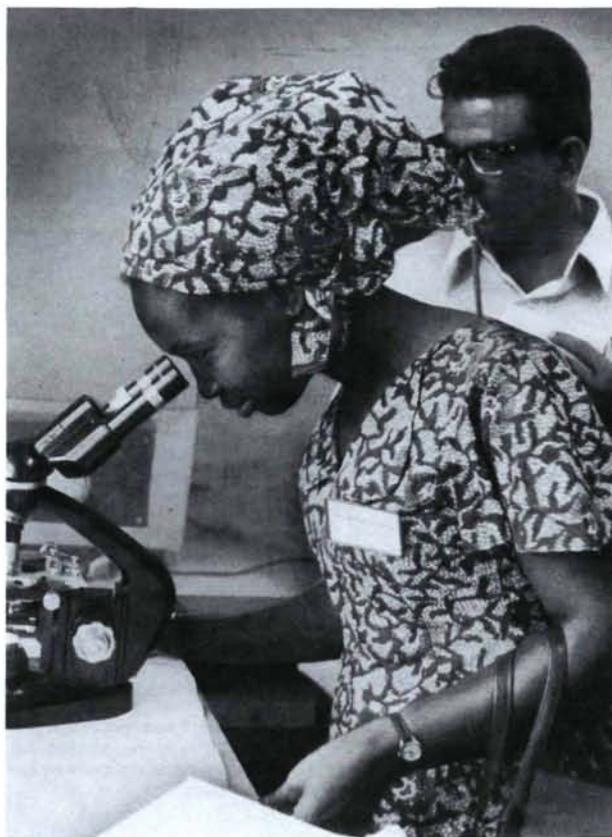
Dans le secteur énergétique, les difficultés inhérentes aux études de faisabilité préalables à la décision de lancer un projet nucléaire sont considérables. De plus, ces études ne peuvent être effectuées que par des experts en énergie qui font partie des groupes intéressés, mais, dans ce domaine peut-être plus que dans d'autres, une aide de l'extérieur s'avère absolument nécessaire. Beaucoup d'autres facteurs doivent être pris en considération: volonté politique du gouvernement intéressé de mener à bien un projet à long terme aussi complexe; compréhension du public et acceptation de l'option nucléaire; capacité de l'industrie nationale de construire, d'exploiter et de poursuivre à la longue pareil projet; et — ce qui n'est pas le moins important — disponibilité de ressources financières suffisantes, à des conditions qui rendent le projet économiquement et techniquement réalisable. Viennent ensuite les autres considérations évidentes et indispensables, relatives aux aspects techniques de l'option nucléaire: sécurité et radioprotection, cycle du combustible, stockage des déchets et déclassement des installations, entre autres.

Compte tenu de tous ces facteurs, quelles sont les perspectives de la mise en valeur du nucléaire dans les pays en développement?

Généralement parlant, puisque la consommation d'énergie ne fait que refléter le degré de développement d'un pays, on peut prédire que la consommation d'énergie devra augmenter avec le temps; à cet égard, il est intéressant de relever que la consommation d'électricité augmente plus rapidement dans les pays en développement que dans les pays industrialisés. La question capitale qui se pose dès lors, c'est de savoir à quel rythme se déroule le phénomène.

Dans les pays en développement, l'introduction de l'énergie nucléé-électrique a été plus lente que prévu. Au 31 octobre 1986, 21 centrales nucléaires étaient en exploitation; 18 autres étaient en construction, dont 9 dans deux pays, l'Inde et la République de Corée. Les

Parmi les pays en développement, la République de Corée exécute l'un des programmes nucléé-énergétiques les plus actifs. On voit ici les maquettes des salles de turbines pour deux tranches d'une centrale nucléaire en construction dans le pays. (Photo: Bulletin nucléaire français, 1986)



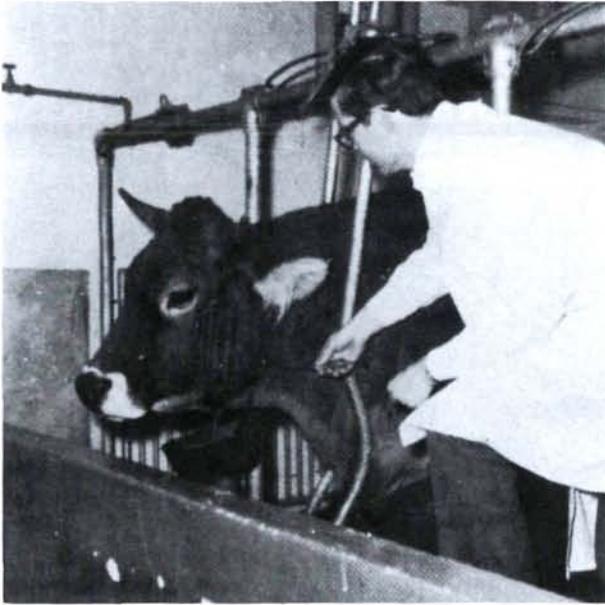
autres se répartissent dans les pays suivants: Argentine, Brésil, Chine, Cuba, Iran, Mexique et Philippines.

Compte tenu des réacteurs dont on sait qu'ils sont reliés au réseau et de ceux qui sont en construction, on estimera la croissance du nucléaire dans les pays en développement d'ici à 1990 à environ 12,7 GWe (gigawatts électriques), ce qui représente 10% de la croissance estimative pour le monde entier (120,5 GWe). Pour un avenir plus éloigné, les estimations très prudentes de l'AIEA concernant la capacité de production du secteur nucléaire se situent (à l'exclusion des pays européens en développement à économie planifiée centralisée) autour de 30 GWe et de 40 GWe en 1995 et 2000 respectivement, ce qui représente — pour les deux dates retenues — 4% de la capacité totale.

Ces prévisions doivent être considérées comme approximatives, puisqu'elles peuvent être influencées par des facteurs ou des événements imprévisibles, par exemple un remaniement éventuel des plans nationaux après l'accident de Tchernobyl, ou l'implantation de réacteurs de petite et de moyenne puissance, dont l'évaluation économique n'est pas encore terminée.

#### Alimentation et agriculture

Les techniques nucléaires sont désormais des instruments indispensables pour la recherche et le développement dans le secteur de l'alimentation et de l'agriculture. Ces méthodes servent surtout à optimiser la nutrition animale ou l'emploi des engrais, la création de nouvelles variétés végétales ou de pesticides plus efficaces et moins nocifs, l'éradication d'insectes nuisibles, ainsi que la conservation de denrées alimentaires. Les pays en développement ont manifesté de bonne heure leur intérêt pour ces méthodes et ils ont fort bien su les mettre à profit. Ils ont souvent mis au point ces méthodes en



Les travaux de recherche sur l'animal impliquent souvent l'injection de traceurs radioisotopiques. Au cours des 30 dernières années, les projets réalisés avec l'assistance de l'AIEA ont porté notamment sur la santé, la nutrition et la productivité animales.

ayant recours aux bons services de la Division mixte AIEA/FAO (Organisation pour l'alimentation et l'agriculture), créée en 1964. Ils bénéficient de quelque 150 projets de coopération technique.

● **Nutrition animale.** Dans beaucoup de pays — en particulier tropicaux et subtropicaux — la pénurie de viande et de lait est due à la faible productivité du cheptel, plus qu'à son insuffisance numérique. On peut utiliser les traceurs radioactifs pour étudier les processus de fermentation, l'utilisation des protéines dans le rumen, et les processus d'assimilation dans l'intestin. Cela permet de choisir des substances nutritives peu coûteuses, telles que la paille, pour accroître le poids des animaux et la production de lait. Ces gains pourront aussi être obtenus grâce à une meilleure gestion de la reproduction chez les animaux; pour ce faire, on fera appel à des méthodes de radioimmunoanalyse (RIA), afin de déterminer les nombreux facteurs pertinents. Tant la RIA que la méthode des traceurs sont aussi appliquées avec succès en prophylaxie animale.

● **Pesticides et engrais.** En agriculture, l'intensification des cultures dans les pays en développement s'accompagne d'une augmentation substantielle de l'emploi d'insecticides; il en sera de même pour les engrais. Généralement parlant, l'utilisation d'engrais, d'insecticides et d'herbicides ont un effet favorable, mais ces substances peuvent aussi finir par s'avérer nuisibles, parce qu'elles, ou leurs sous-produits, sont entraînés par les eaux de surface et les eaux souterraines. On connaît des cas d'eutrophisation de lacs dus à des engrais lixiviés à partir de sols cultivés. Pour optimiser l'utilisation de ces substances, on doit connaître les phénomènes de transport et les effets de l'interaction avec l'environnement auquel elles sont exposées après leur application. La méthode des traceurs est le procédé de choix pour qui veut procéder à ces études avec succès. On peut, par exemple, déterminer dans quelle mesure le taux des pertes d'insecticides dépend de la température, des

précipitations, de l'insolation, ainsi que de la nature du sol et de la plante cultivée.

● **Mutagenèse et sélection des semences.** Une autre technique nucléaire importante qui permet d'accroître la production alimentaire est l'irradiation des semences, à l'aide de rayons gamma ou de neutrons rapides, pour induire des mutations. La diversité génétique des espèces parmi lesquelles on sélectionne s'en trouve élargie et, lorsqu'on les combine, elles peuvent produire des variétés qui présentent les propriétés voulues — meilleur rendement, résistance aux conditions extérieures défavorables, tolérance de l'eau salée, meilleure résistance aux maladies. Comme il est facile de le deviner, cette technique est intéressante pour un grand nombre de pays en développement. L'AIEA dispose d'un programme très actif dans ce domaine; elle participe à une vingtaine de projets de coopération technique en la matière. L'Agence a souligné l'intérêt de ces méthodes pour les pays en développement et beaucoup d'entre elles sont activement mises en œuvre dans le tiers monde. Ces applications continueront à se développer, car elles répondent à des préoccupations essentielles et sont fort bien acceptées par le public. Leur rythme d'expansion dépend des conditions propres à chaque pays, notamment sur le plan économique.

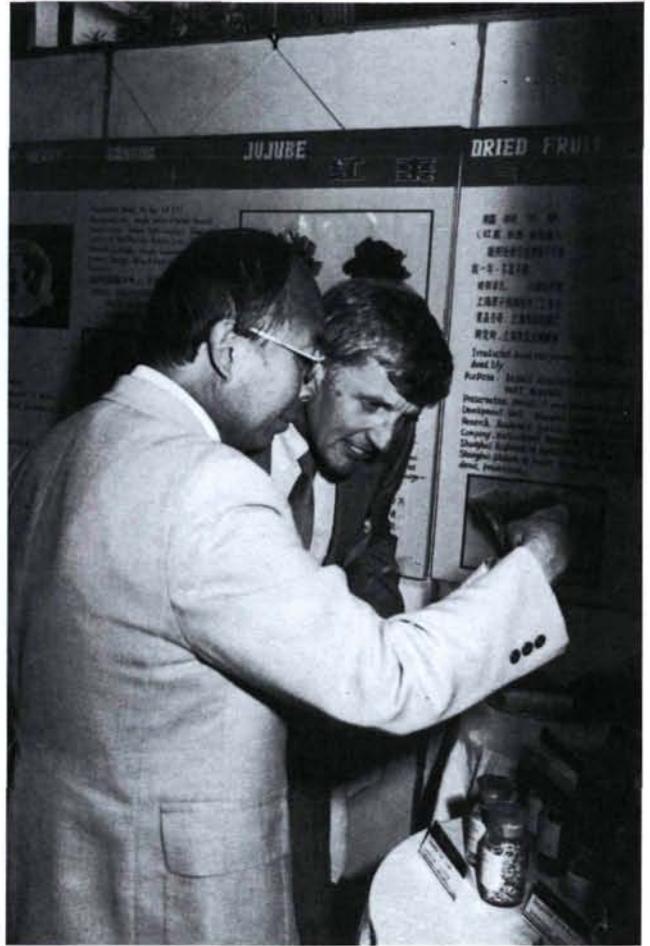
● **Irradiation des denrées alimentaires.** La conservation d'aliments par irradiation est un procédé qui a fait ses preuves. Il inhibe la germination des légumes, prolonge leur durée de conservation, détruit les agents pathogènes, les parasites et les insectes qui s'attaquent aux aliments; enfin, il assure la stérilisation microbienne des épices et des condiments secs. Le procédé est particulièrement utile aux pays en développement, notamment ceux des régions tropicales, pour conserver les produits alimentaires et assurer la désinfection des épices. Certains de ces pays, de même que bon nombre de pays industrialisés, ont autorisé l'irradiation de nombreux produits. Les conclusions formulées en 1981 dans le cadre d'un projet international d'irradiation de denrées alimentaires, selon lesquelles les produits irradiés à une dose moyenne totale inférieure à 10 kilograys pouvaient être consommés sans danger, ainsi que l'adoption par la Commission du Codex Alimentarius, en 1983, de normes pour les aliments irradiés, vont probablement encourager l'adoption de cette méthode. Au cours des trois dernières années, nous avons constaté, dans le cadre du programme de coopération technique de l'Agence, l'intérêt croissant que l'irradiation des produits alimentaires suscite auprès des Etats Membres en développement; la tendance ne fait que se confirmer. La compréhension du public et l'acceptation des aliments irradiés: voilà l'obstacle principal auquel se heurte encore l'expansion rapide de la technique. Tout le monde reconnaît maintenant la nécessité de vastes efforts qui restent à accomplir pour obtenir que le grand public accepte les avantages nombreux et notables que présente l'irradiation des aliments.

#### Industrie et sciences de la terre

Certaines applications des techniques nucléaires dans les domaines de l'industrie et des sciences de la terre ont été parmi les premières à être mises au point; elles sont désormais bien établies, en tant que pratiques classiques, souvent mises en œuvre à l'échelle commerciale.



Deux des centaines de participants au séminaire FAO/AIEA pour l'Asie et le Pacifique sur l'application pratique de l'irradiation des aliments, qui s'est tenu à Changhaï en avril 1986. La maquette est celle de l'installation d'irradiation de Changhaï, qui est maintenant en service.

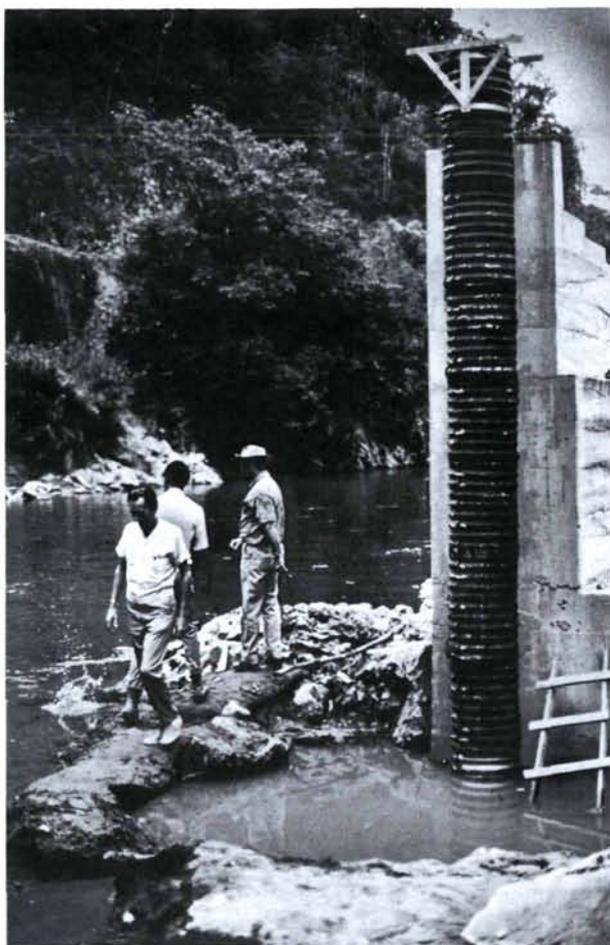


● **Jauges d'épaisseur, de densité et de niveau.** Presque toutes les machines à fabriquer le papier sont munies de jauges nucléaires qui fournissent en continu des données sur la densité de surface du papier; presque toutes les grandes aciéries sont équipées de jauges d'épaisseur nucléaires. En outre, on utilise des milliers de jauges de niveau dans divers procédés industriels. Ces appareils ne font plus l'objet de travaux de recherche et développement, sauf pour la solution de problèmes très particuliers. Leur introduction dans les pays en développement suit lentement l'industrialisation. On relèvera que l'Accord régional de coopération de l'AIEA et du Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD) joue un rôle extrêmement positif et stimulant, en vue d'introduire ce type de matériel dans la région Asie et Pacifique, notamment pour les jauges de densité et d'épaisseur.

● **Les traceurs dans l'industrie.** L'application de traceurs dans l'industrie s'est développée rapidement depuis la fin de la seconde guerre mondiale. Elle fournit une méthode simple pour remédier aux «pannes» dans l'industrie manufacturière, elle résout divers problèmes de mesure et offre des solutions de plus en plus perfectionnées en matière d'optimisation et de surveillance des opérations. Dans ce dernier cas, la méthode doit son succès au fait d'être la seule capable de régler le problème de la dispersion. Celle-ci est d'une importance cruciale, soit qu'elle intervienne dans des procédés industriels (mélanges, réactions chimiques), soit que l'on veuille l'empêcher (transport des fluides dans des tuyauteries). Dans nombre de pays industrialisés la méthode est couramment utilisée par les entreprises de services. Dans d'autres pays, elle n'est appliquée qu'en laboratoire ou à l'échelle d'opérations pilotes, et il est

difficile d'obtenir l'autorisation d'utiliser des traceurs dans les usines. A cet égard, on verra sans nul doute se dégager une attitude moins restrictive, du fait que l'optimisation des procédés préoccupe constamment les industries et les sociétés d'ingénierie et que la méthode des traceurs est souvent la seule à pouvoir être appliquée. Les essais effectués dans les entreprises ne mettent jamais en œuvre que des quantités minimales de radioactivité; en outre, ces essais font toujours appel à des isotopes de très courte période. Rares sont les pays en développement qui utilisent avec succès les traceurs dans l'industrie, mais il y a lieu de supposer que cette méthode y se diffusera, car le coût des infrastructures nécessaires est négligeable comparé aux avantages que l'on obtient, et elle accompagnera nécessairement le processus d'industrialisation.

● **Essais non destructifs.** Les méthodes nucléaires d'essais non destructifs, essentiellement la radiographie gamma, sont communément utilisées dans la plupart des pays en développement. Le contrôle de la qualité du matériel est souvent une question essentielle; il constitue aussi un facteur de compétitivité. Telle est probablement la raison pour laquelle on y a recours dans une si large mesure. Diverses activités se déroulent sur le plan international avec la participation de l'AIEA; elles sont conçues pour harmoniser les méthodes de formation, à l'intention des techniciens spécialistes de ces méthodes. On peut prévoir une expansion de ce type d'analyse dans



L'AIEA a aidé de nombreux pays qui s'intéressent aux applications des isotopes à l'étude des problèmes d'approvisionnement en eau. A la Jamaïque, pendant les années 1960, l'Agence a procédé à des études isotopiques dans le cadre d'un projet du Programme des Nations Unies pour le développement.

les pays en développement, à mesure que progresseront les industries manufacturières nationales. Le phénomène se confirmera sans nul doute à la longue, lorsque le contrôle de la qualité s'imposera dans certains pays au niveau du marché local. A cet égard, Singapour nous ouvre peut-être dès aujourd'hui une fenêtre sur l'avenir. On y poursuit une politique d'achat d'usines «clefs en mains» et l'on y insiste particulièrement sur la mise au point de méthodes de contrôle de la qualité pour les marchandises destinées à l'exportation.

● **Radiochimie.** L'utilisation des rayonnements comme source d'énergie dans différents procédés industriels s'est développée graduellement, pour aboutir à un certain nombre d'applications solidement établies. L'évolution a commencé au début des années cinquante par la radiostérilisation industrielle du matériel médical; depuis lors, des applications nouvelles sont venues s'y ajouter, à la suite d'importants travaux de recherche fondamentale et appliquée sur les rayonnements. La modification radio-induite des polymères est désormais un procédé industriel courant, notamment dans l'industrie des fils et des câbles, dans celle des emballages et dans d'autres encore. La conservation par irradiation s'est

également étendue à une vaste gamme d'applications, venant ainsi remplacer ou compléter la méthode des rayons ultraviolets et les procédés thermiques, entre autres. A l'heure actuelle, quelque 150 irradiateurs industriels de grande capacité (la plupart équipés de sources gamma au cobalt 60) sont en service dans plus d'une quarantaine de pays. Plusieurs centaines d'accélérateurs à faisceaux d'électrons servent à des usages commerciaux pour différents types d'opérations de réticulation et de conservation.

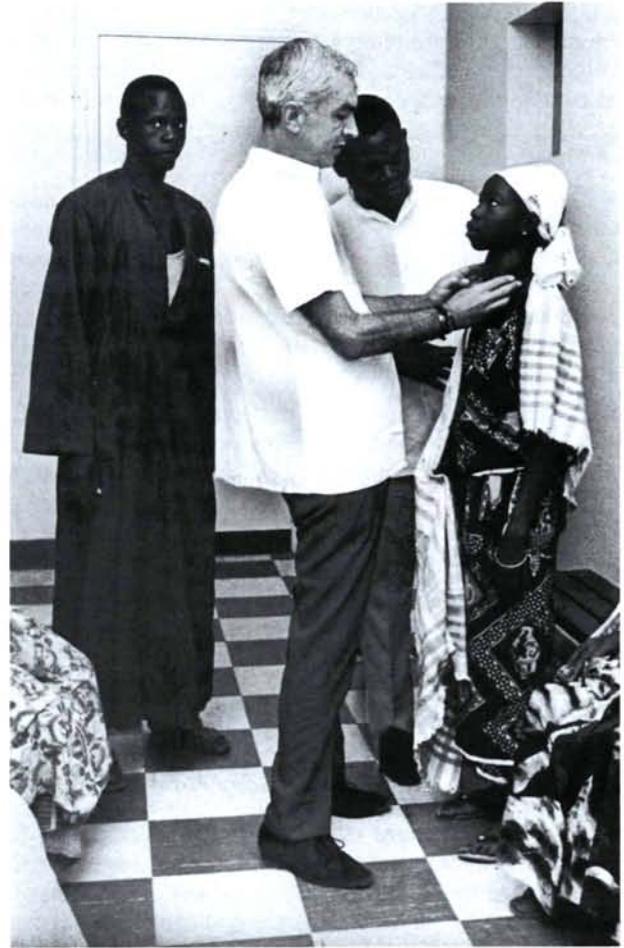
Des procédés nouveaux sont à l'étude et l'on prévoit qu'ils seront commercialisés dans un proche avenir. Nous avons déjà mentionné la radioconservation des produits alimentaires. On citera aussi la décontamination par irradiation des déchets que l'on veut réutiliser sans danger (eaux usées, boues), le radiotraitement des effluents gazeux de l'industrie pour protéger l'environnement, ainsi que diverses applications biomédicales. Contrairement à une opinion répandue, le traitement par irradiation est souvent mieux adapté aux besoins des pays en développement que toute autre technique plus classique. Ainsi, la radiostérilisation industrielle est un procédé simple et fiable, sans danger pour l'environnement et pour le personnel qui manipule les sources de rayonnements. Les normes de sécurité applicables sont les mêmes dans les pays en développement que dans la plupart des pays développés. Il n'en est pas ainsi pour les techniques rivales qui mettent en œuvre des gaz toxiques, car les normes de sécurité très strictes appliquées dans les pays avancés ne sont jamais respectées dans les pays moins développés. L'intérêt de la radiostérilisation a été reconnu il y a longtemps par les pays en développement, dont beaucoup disposent d'installations d'essai. Les avantages du procédé sont évidents et son influence sur les conditions générales d'hygiène des soins médicaux est considérable.

En revanche, les avantages que présentent les techniques nucléaires dans d'autres domaines ne sont pas encore appréciés à leur juste valeur. Une des raisons principales en est peut-être le niveau des programmes nationaux en science et technique nucléaires. Sur le plan de l'ingénierie radiologique, de la physique des rayonnements et de la radiochimie, on constate que l'infrastructure, la formation de base et la documentation sont insuffisantes. Il est donc difficile de bien discerner les possibilités industrielles et de préparer et exécuter des projets à vocation industrielle. On a pu constater que les pays dotés de programmes de recherche radiologique relativement avancés étaient mieux à même d'appliquer de bonne heure les techniques nouvelles et de procéder au transfert de cette technologie. Des méthodes plus complexes, telles que les procédés de réticulation et de conservation par les rayonnements, ne sont transférables que très lentement. Les difficultés sont nombreuses, surtout faute de moyens nationaux de recherche suffisants pour le contrôle de la qualité, le contrôle des procédés et leur perfectionnement, l'étude de nouveaux produits, et ainsi de suite. De nombreux pays en développement ont fort bien reconnu les possibilités d'application industrielle des rayonnements, et les besoins en la matière ne cesseront d'augmenter. La croissance se fera dans le sillage de l'industrialisation générale, stimulée par la nécessité de relever les normes

sanitaires, d'assurer la sécurité du personnel, la qualité des produits et la conservation de l'environnement, et pour d'autres raisons encore.

● **Techniques analytiques nucléaires.** Comme toutes les techniques analytiques, elles ont des incidences sur de nombreuses branches de la recherche et de la technologie. Leurs applications sont particulièrement importantes dans l'industrie et dans les sciences de la terre. Elles comportent entre autres l'analyse par activation à l'aide de neutrons épithermiques et rapides, et diverses méthodes de marquage, telles que l'analyse par dilution isotopique, par fluorescence X induite par des rayonnements ionisants et, par extension, la fluorescence X, quel que soit le mode d'excitation. Ces techniques sont très répandues dans de nombreux laboratoires d'analyse, qui appliquent par ailleurs des méthodes autres que nucléaires. En particulier, l'analyse par activation est utilisée dans des secteurs tels que la prospection des minerais, la géologie, la médecine, la surveillance de l'environnement et la recherche industrielle. De nombreux projets de coopération technique de l'AIEA portent sur l'introduction de ces méthodes dans les pays en développement, où un certain nombre de laboratoires ont été créés. Lorsqu'ils comportent aussi l'analyse par activation, ces laboratoires sont établis auprès de réacteurs de recherche ou de générateurs de neutrons. Ils fournissent d'habitude le support analytique des travaux effectués dans les centres d'études nucléaires ou autres établissements nationaux. La fluorescence X n'exige pas que l'on dispose de vastes installations telles que réacteurs ou accélérateurs de particules; elle est mise en œuvre, par exemple, pour les opérations de prospection et d'extraction minière, dans l'industrie, et dans divers établissements de recherche. Un laboratoire d'analyse par activation est souvent prévu en association avec un réacteur de recherche, pour servir de support à d'autres activités qui ne sont pas toujours déterminées à l'avance. Cela peut aboutir à la mise au point d'une méthode d'analyse comme fin en soi, et non point comme moyen pour résoudre un type particulier de problème. On évitera cet écueil en déterminant soigneusement les besoins de l'utilisateur final de la méthode étudiée. On peut prédire que les méthodes analytiques nucléaires continueront à se multiplier dans les pays en développement. Les conditions sont maintenant bien connues dans les pays les plus avancés et le rôle des techniques nucléaires, par opposition aux techniques non nucléaires, est bien compris de tous. Il semble que les besoins existent dans les pays en développement mais qu'ils n'ont certainement pas encore été pleinement explorés.

● **Hydrologie des isotopes.** Il est banal de rappeler que les problèmes d'alimentation en eau sont cruciaux pour les pays en développement. Des techniques nucléaires faisant appel, d'abord aux traceurs artificiels, et ensuite aux traceurs qui existent dans l'environnement, tels que le deutérium, l'oxygène 18, le tritium, le carbone 14, et d'autres encore, ont été parmi les premières à être mises en œuvre depuis le début des années 50. Les problèmes se posent à tous les stades du cycle hydrologique et la contribution desdites techniques à leur solution est universellement reconnue, qu'elles soient utilisées



Dès 1967, l'AIEA a participé à un projet au Laboratoire de radioisotopes de l'Institut Ouest-Africain de recherche sur le cancer, dépendant de l'hôpital Dantec de Dakar. Actuellement, au titre d'autres projets, l'AIEA continue à aider le Sénégal dans le domaine de la médecine nucléaire. (Photo: ONU)

seules ou en combinaison avec des méthodes classiques. Le marquage naturel des eaux par des isotopes stables de l'hydrogène et de l'oxygène, ou la désintégration radioactive des éléments naturels qu'elles contiennent servent à résoudre les problèmes de rapports, de mélanges, d'origine et de datation. L'AIEA a joué un rôle important lors de l'établissement de laboratoires d'hydrologie isotopique dans de nombreux pays en développement. Il reste encore beaucoup de chemin à parcourir avant que soient résolus les problèmes des ressources en eau dans la plupart des pays en développement. Voilà pourquoi les activités des laboratoires intéressés se multiplient et pourquoi d'autres laboratoires vont être créés. Ils devront s'occuper de problèmes nouveaux, telle la pollution des eaux, ou encore contribuer à la mise en valeur d'autres richesses naturelles telles que les sources géothermiques, encore inexploitées.

#### Médecine nucléaire

En médecine, les traceurs radioactifs ont été largement appliqués et avec fruit; c'est ce qu'on appelle généralement la médecine nucléaire. Une soixantaine de pays en développement disposent maintenant de

programmes dans ce domaine. Les traceurs servent au diagnostic et au traitement des maladies, de même qu'à la recherche médicale. Il existe quatre modalités principales d'application de ces méthodes, classées suivant la manière dont on détecte les rayonnements et dont on administre les traceurs.

- Le traceur est administré au malade et les rayonnements sont mesurés en dehors de son organisme. L'imagerie nucléaire des organes du corps rentre dans cette catégorie, par exemple les scintigrammes cérébraux, ainsi que tous les tests destinés à décrire un processus physiologique, tels que l'excrétion rénale d'une molécule marquée.

- Le traceur contenu dans un échantillon de liquide physiologique est mesuré *in vitro* pour déterminer, par exemple, le volume sanguin ou pour étudier l'absorption de vitamines.

- Le malade ne reçoit aucun traceur et tous les tests ont lieu *in vitro*: tel est le cas, par exemple, des dosages hormonaux par radioimmunoanalyse (RIA).

- La quatrième modalité est celle des actes thérapeutiques à l'aide de radioisotopes, dont le traitement du cancer de la thyroïde par le radioiode est un exemple bien connu.

La RIA, qui permet d'étudier le système de défense immunitaire de l'organisme ou de procéder à des diagnostics, a acquis une importance considérable, notamment au cours des dix dernières années, car elle permet de faire des mesures très sensibles d'antigènes ou d'anticorps. En outre, l'imagerie nucléaire, qui permet de voir les organes marqués après ingestion d'un traceur radioactif par le malade, a connu un développement remarquable au cours des quelques dernières années. On a parcouru beaucoup de chemin depuis les premiers scintigraphes jusqu'aux caméras gamma qui, une fois reliées à un ordinateur, permettent d'obtenir une tomographie, c'est-à-dire la visualisation de plusieurs coupes successives d'un organe. Ces méthodes, parmi d'autres pratiquées en médecine nucléaire, exigent l'emploi de produits radiopharmaceutiques hautement spécialisés, qui doivent satisfaire à des normes très strictes de contrôle de la qualité. La préparation de ces produits donne lieu à une industrie très active. La mise au point de nouveaux produits, y compris les procédures de contrôle de la qualité et la panoplie des instruments requis, est presque exclusivement l'œuvre des laboratoires nationaux et privés ou commerciaux les plus modernes et les mieux dotés des pays à technologie avancée. A quelques exceptions près, les laboratoires des pays en développement n'ont pas participé à cette évolution. D'ailleurs, la mise au point de nouveautés radiopharmaceutiques commercialisables est un processus coûteux et de longue haleine, qui dure souvent plusieurs années et exige des ressources financières et humaines considérables. Cependant, le délai entre l'essai d'un produit nouveau et l'autorisation de son emploi clinique dans un pays techniquement avancé, et la préparation d'un produit analogue sur le plan local (d'habitude au centre national d'études nucléaires d'un pays en développement) n'est pas aussi long que dans bien d'autres domaines. Dans certains cas, il n'a pas fallu plus d'une année, ce qui montre que l'on a su tirer

meilleur parti, particulièrement dans les pays en développement les plus avancés, d'une information et de connaissances techniques qui circulent assez facilement. La situation se présente évidemment sous un jour tout à fait différent dans les pays en développement moins avancés, lesquels n'importent pas les trousseaux radiopharmaceutiques que produisent seulement quelques grands fournisseurs.

Il existe toutefois un domaine voisin, en médecine nucléaire, qui n'a fait l'objet que d'un transfert de technologie très limité. Il s'agit de la production et de la distribution de radioisotopes et de générateurs de radioisotopes à usage médical. La technologie des générateurs du radioisotope le plus répandu en médecine nucléaire dans le monde entier, le technétium 99 métastable, fait appel à des opérations chimiques très complexes et coûteuses qui comportent la production de molybdène 99 de fission, précurseur du technétium 99m. Seuls quelques-uns des pays industrialisés les plus avancés fabriquent des générateurs de technétium. Les pays en développement ont trouvé extrêmement difficile d'assimiler cette technologie et d'en acquérir la maîtrise, tant pour des raisons économiques que par suite du manque, aussi bien de réacteurs ayant des flux appropriés de neutrons, que d'installations de transformation adéquates. Certains pays importent des générateurs de technétium 99m en quantité, bien qu'ils possèdent des réacteurs de recherche qui fonctionnent. Grâce à des idées novatrices, une nouvelle technologie des générateurs se prépare; elle permettra d'utiliser des réacteurs de recherche de moyenne et de faible puissance. Certains de ces procédés sont déjà connus depuis des années; toutefois, les progrès ont été lents. Les grands fabricants ne sont toujours pas intéressés à faire avancer cette technique, faute d'un stimulant commercial suffisant. Néanmoins, certains pays en développement ont compris qu'ils bénéficieraient grandement de ces techniques nouvelles; ils ont donc lancé d'importants programmes de recherche, conçus pour mettre au point de nouveaux générateurs de radionucléides à usage clinique, et ils ont utilisé à ces fins leurs propres réacteurs de recherche. Cet exemple montre que les techniques qui n'ont de l'intérêt que pour les pays en développement, ou qui ne présentent qu'un intérêt marginal pour les pays avancés, doivent être mises au point par les pays mêmes qui en ont besoin. Heureusement, dans le cas de la technologie des générateurs, certains pays en développement évolués ont eux-mêmes pris la tête de la recherche dans ce domaine et ils partagent leur expérience et leurs résultats avec des centres de pays moins développés.

Ces réflexions sur les problèmes de fabrication des produits radiopharmaceutiques dans les pays en développement donnent à penser qu'à court ou à moyen terme la plupart de ces produits devront vraisemblablement encore être importés. Par ailleurs et selon toute probabilité, les applications de la RIA continueront à se multiplier, particulièrement sous l'impulsion de l'AIEA, car il existe dans ce domaine des problèmes cruciaux qui, peut-être plus encore que dans tout autre secteur, exigent une coopération internationale. Il est beaucoup plus risqué d'essayer de formuler des prévisions quant à l'imagerie nucléaire, car cette spécialité exige des capitaux considérables et continue d'évoluer rapidement.