

Les techniques nucléaires et le développement durable: ressources en eau et pollution de l'environnement

Les Laboratoires de l'AIEA de Seibersdorf et de Vienne œuvrent de maintes façons pour notre environnement

par Pier Roberto Danesi

La pollution de l'air, des terres et des cours d'eau est aujourd'hui un grave problème mondial et menace la santé publique et l'environnement, tandis que deux milliards d'habitants de 80 pays souffrent d'un manque chronique d'eau.

Un air pur et de l'eau en quantité suffisante sont essentiels au maintien de la vie des végétaux, des animaux et de l'être humain. Or, les déchets des produits chimiques utilisés en quantité par l'industrie et les particuliers du fait du développement industriel peuvent, dans certaines circonstances, nuire à la santé publique et à l'environnement. Déversés sans discrimination dans notre environnement, ces produits peuvent modifier l'absorption par les organismes vivants de divers éléments traces, dont certains sont indispensables à la vie mais seulement en quantités infinitésimales soigneusement dosées.

Les problèmes de l'approvisionnement en eau et de la pollution sont au nombre des grandes questions écologiques dont s'occupent les scientifiques des Laboratoires de l'AIEA de Seibersdorf et de Vienne. Grâce à un ensemble de projets et de services scientifiques et techniques, les Laboratoires mettent au point et transfèrent des technologies qui se prêtent à d'importantes applications, en particulier dans les pays en développement. Il s'agit notamment d'évaluer les ressources en eau et leur contamination éventuelle et d'étudier par des méthodes sensibles les métaux toxiques, pesticides et autres polluants présents dans l'environnement, en ayant fréquem-

ment recours à des méthodes analytiques utilisant les rayonnements et les isotopes, telles que l'analyse par activation neutronique, la fluorescence X, la spectrométrie d'absorption atomique, les indicateurs et autres techniques.

Dans ce second article, nous donnerons un aperçu des principales activités des Laboratoires de Seibersdorf qui contribuent à un développement durable*. Les Laboratoires assurent aussi la coordination de nombreux réseaux de recherche auxquels participent des scientifiques de laboratoires d'analyse du monde entier.

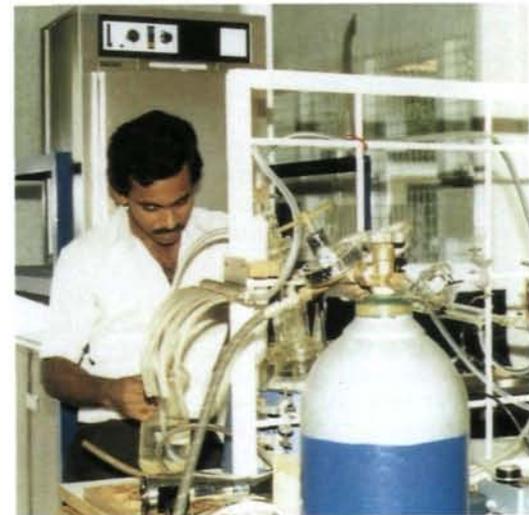
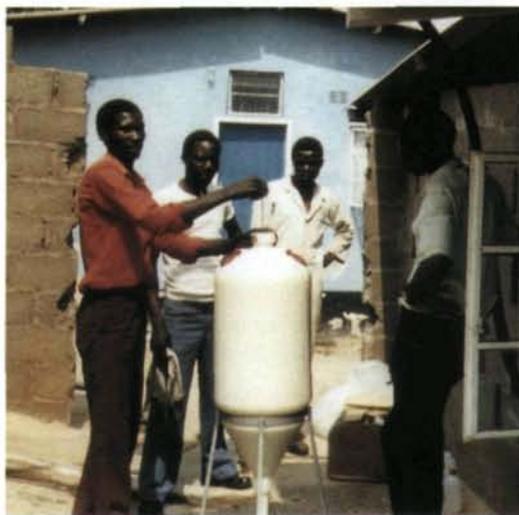
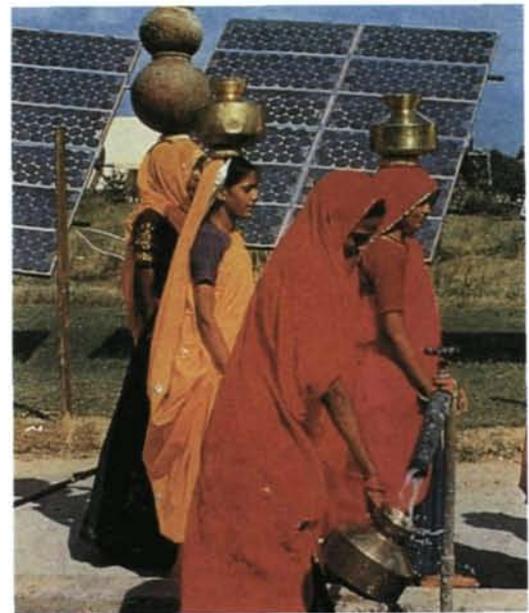
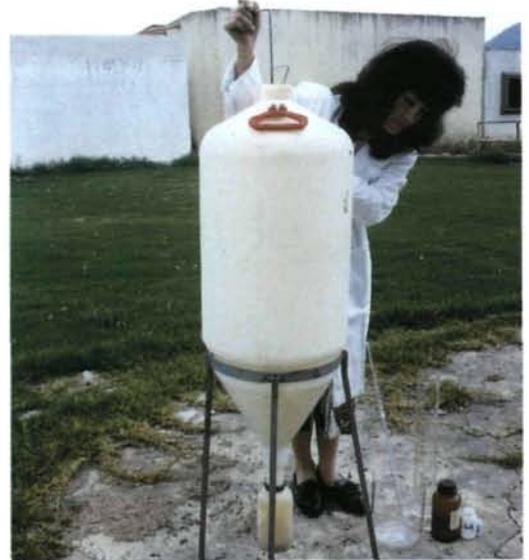
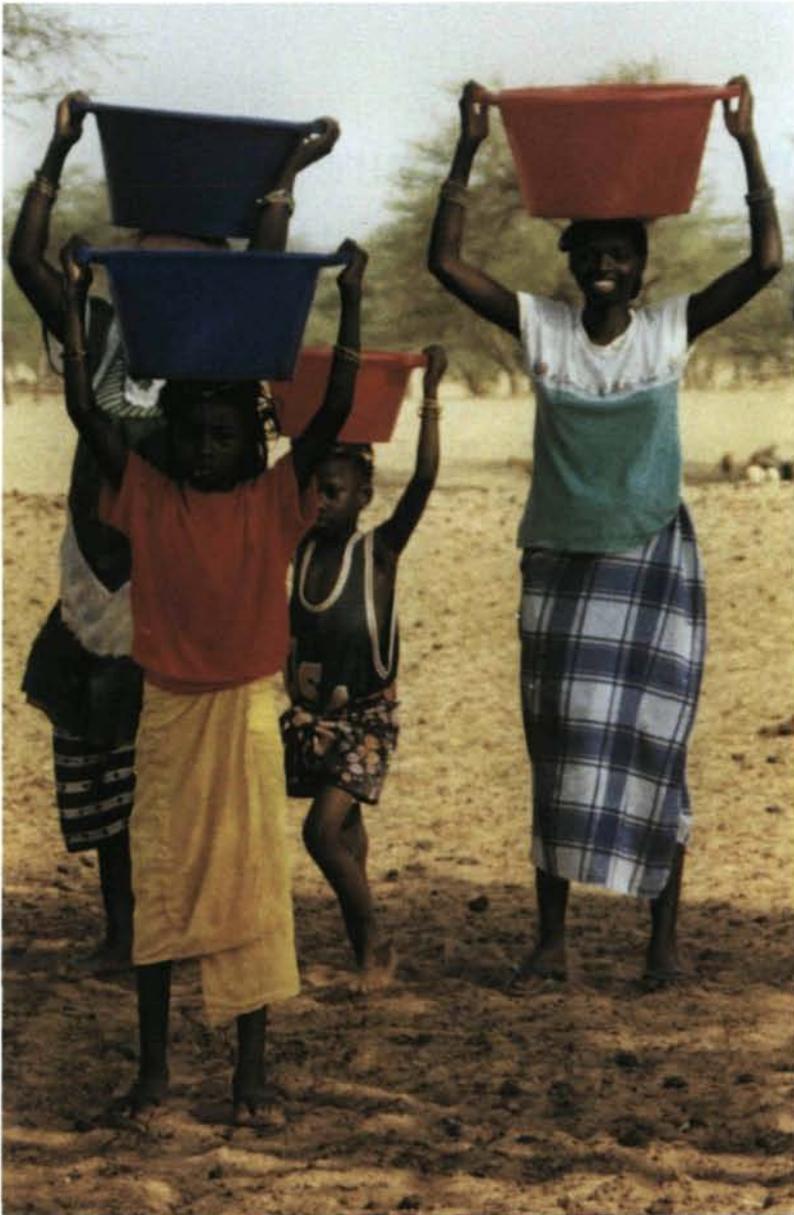
Etudes hydrologiques à l'aide d'isotopes

A mesure que les populations humaines et animales s'accroissent, il apparaît que la situation de l'eau dans le monde devient catastrophique:

En Egypte, les prévisions indiquent qu'à la fin de ce siècle les hommes, les femmes et les enfants ne disposeront individuellement que des deux tiers de la quantité d'eau qu'ils ont actuellement. Au Kenya, ce ne sera que la moitié. En l'an 2000, six des sept pays d'Afrique orientale et les cinq pays riverains du sud de la Méditerranée connaîtront une pénurie d'eau. Pour la Pologne, Israël et les régions arides des Etats-Unis, la situation n'est pas loin d'être critique. En Chine, 50 villes sont déjà menacées de graves pénuries d'eau; le niveau de la nappe phréatique de Beijing baisse jusqu'à deux mètres par an et l'on juge qu'un tiers des puits du pays sont à sec. A Tamil Nadu, en Inde, la nappe phréatique a baissé de 25 mètres au cours des 20 dernières années et le

M. Danesi est directeur des Laboratoires de l'AIEA de Seibersdorf et de Vienne. Cet article fait suite à un article sur le développement agricole durable déjà paru dans le *Bulletin de l'AIEA*. MM. Markowicz, Valkovic et Zeisler, des Laboratoires de l'AIEA, ont collaboré à la rédaction du présent article; l'auteur remercie également de leur contribution MM. Froehlich, Rozanski et Parr, du Département de la recherche et des isotopes de l'AIEA.

* Le premier article porte sur le développement agricole et les projets du programme FAO/AIEA; il est paru dans le *Bulletin de l'AIEA*, volume 34, n° 4.



Pour aider à protéger et à mettre en valeur les ressources en eau, les Laboratoires de l'AIEA assistent des projets de recherche dans le monde entier, en utilisant des isotopes stables et radioactifs ainsi que des méthodes analytiques nucléaires associées très sensibles. (Photos: Yurtsever, Aranyossy/AIEA)

nombre des villages de l'Uttar Pradesh qui manquent d'eau est passé de 17 000 à 70 000.

Non seulement l'eau devient rare, mais sa qualité se dégrade. Le ruissellement provenant des terres agricoles saturées de pesticides et d'engrais pollue fleuves, rivières et lacs. L'eau des précipitations orageuses qui s'écoule des agglomérations urbaines emporte des effluents d'égouts, des métaux lourds, des huiles, des hydrocarbures, des détritiques, des produits chimiques et des déchets organiques provenant des animaux et de la poussière. Il est clair qu'il faut redoubler d'efforts pour protéger les ressources en eau actuelles, mettre en valeur de nouvelles sources durables d'approvisionnement et améliorer la distribution et la surveillance des eaux.

Il importe en particulier d'évaluer les ressources de nombreux pays en développement, car l'information hydrologique classique y est insuffisante. Dans maints autres pays, la plupart des ressources en eau sont connues et exploitées, et les ressources non encore prospectées sont fort probablement limitées. Le seul moyen de répondre à la demande d'eau consiste donc à protéger les ressources existantes. Cette démarche est d'une importance vitale tant dans les pays industrialisés que dans les pays en développement, et c'est le pari le plus audacieux de l'avenir proche.

Le problème est double: il faut d'une part protéger la qualité de l'eau en éliminant ou en limitant le risque de contamination et, d'autre part, éviter l'épuisement des ressources en pratiquant une exploitation rationnelle et durable.

Les techniques isotopiques jouent un grand rôle dans l'évaluation, la gestion et la protection des eaux. Les isotopes sont en effet de puissants auxiliaires pour l'étude des masses d'eau, car ils permettent de mieux évaluer les volumes et de les exploiter plus rationnellement. Ils peuvent aussi servir à évaluer le risque de contamination et à étudier le mouvement et le comportement des polluants, et à déterminer les modes d'écoulement et à distinguer entre le mouvement de l'eau et celui des contaminants, généralement plus lent du fait des interactions avec les matrices rocheuses.

Il faut disposer d'une abondante information hydrologique pour bien gérer les ressources en eau, et les isotopes stables ou radioactifs des deux éléments de l'eau — l'hydrogène et l'oxygène — sont devenus de précieux outils pour l'obtenir. Les techniques isotopiques présentent de grands avantages par rapport aux méthodes classiques pour marquer les eaux en mouvement. Les colorants, par exemple, risquent de disparaître par adsorption ou réaction chimique en présence de constituants dissous.

Le Laboratoire d'hydrologie isotopique de l'AIEA, installé à Vienne, assiste les programmes d'hydrologie de l'Agence. Il offre notamment ses services pour la recherche sous contrat et pour les projets de coopération technique de l'AIEA et mesure les teneurs isotopiques des précipitations pour un réseau mondial de stations. Il analyse les

échantillons d'eau, distribue des étalons, aide à installer des laboratoires d'hydrologie isotopique dans les Etats Membres, normalise les méthodes de mesure et organise des comparaisons interlaboratoires de résultats. Il est équipé pour doser le tritium de l'eau par enrichissement électrolytique suivi d'un comptage à l'aide d'un compteur à scintillateur liquide ou d'un détecteur proportionnel à gaz; pour doser le carbone 14 dans l'eau à l'aide d'un détecteur proportionnel à gaz; pour déterminer les proportions de deutérium et d'oxygène 18 dans l'eau et de carbone 13 dans le dioxyde de carbone, par spectrométrie de masse; pour détecter les principaux ions à l'état de traces dans l'eau par analyse chimique; pour mesurer la conductivité et le pH.

Les isotopes de l'environnement dans les précipitations

Le Laboratoire s'occupe également d'acquiescer et d'analyser des données sur les isotopes de l'environnement dans les précipitations et collabore à leur publication. C'est ainsi que l'AIEA, en collaboration avec l'Organisation météorologique mondiale (OMM), relève depuis 1961 les concentrations des isotopes de l'hydrogène et de l'oxygène dans les précipitations. Ce dernier programme consiste en particulier à recueillir systématiquement l'information permettant de préciser les variations dans le temps et dans l'espace de la teneur des précipitations en isotopes naturels afin de fournir des données de base pour les enquêtes hydrologiques visant à recenser, planifier et développer les ressources en eau. L'information fournie par le réseau est particulièrement utile aux premiers stades d'un projet hydrologique vu le besoin dès le début de renseignements sur la distribution des isotopes naturels des précipitations dans le secteur étudié.

Au cours des dernières années, le réseau s'est en outre avéré fort utile en fournissant des renseignements permettant de vérifier et d'améliorer encore les modèles de la circulation atmosphérique, et de mener des études climatologiques.

Les échantillons de précipitations, recueillis par les 350 stations météorologiques de 79 pays, sont analysés pour déterminer leur teneur en tritium, deutérium et oxygène 18, et les résultats sont publiés dans une publication suivie intitulée *Environmental Isotope Data World Survey of Isotope Concentration in Precipitation* avec indication de la marge d'erreur analytique signalée par les laboratoires. De même, certaines variables météorologiques sont enregistrées (type et volume des précipitations, pression de vapeur, température de l'air). Environ 50% des échantillons de précipitations sont analysés par les Laboratoires de l'AIEA, le reste par ceux des établissements participants.

S'y ajoutent les opérations d'assurance de la qualité et de traitement des données, qui ont toute

leur importance. Dès la mise en place du réseau, on a établi des procédures techniques détaillées pour les stations d'échantillonnage et une formule type pour la présentation des résultats. De plus, les Laboratoires de l'AIEA organisent périodiquement des comparaisons entre les laboratoires des établissements participants des Etats Membres pour maintenir la qualité des analyses.

Le Laboratoire d'hydrologie de l'Agence analyse chaque année environ 500 échantillons d'eau pour en doser le deutérium, l'oxygène 18 et le tritium. Pour l'oxygène 18, on équilibre l'échantillon avec du dioxyde de carbone, la mesure étant obtenue à partir du rapport isotopique obtenu par spectrométrie de masse. Pour le deutérium, on procède par spectrométrie de masse sur l'hydrogène qui se dégage de l'eau par réduction au zinc. Pour les rapports carbone 13/carbone 12, le carbone 14 et le tritium, l'échantillon d'eau naturelle est soumis à un traitement préalable, puis analysé à l'aide d'instruments extrêmement sensibles (spectromètres de masse, compteurs proportionnels à gaz ou détecteurs à scintillateurs liquides) qui permettent de détecter les faibles concentrations de ces radionucléides dans les divers échantillons.

Des analyses sont également faites pour les projets de coopération technique et les contrats de recherche de l'AIEA. En ce qui concerne les premiers, environ 850 échantillons sont analysés chaque année pour déterminer les rapports deutérium/hydrogène et oxygène 18/oxygène 16, 60 échantillons pour les rapports carbone 13/carbone 12 et la teneur en carbone 14 des carbonates dissous, 600 échantillons pour le tritium. Quant aux contrats de recherche, 300 échantillons d'eau sont analysés par an pour doser le deutérium et l'oxygène 18, 100 pour le tritium et 30 pour le carbone 14.

A quoi sert l'information communiquée par le réseau AIEA/OMM? A part son emploi généralisé dans les équipes hydrologiques, elle est exploitée en océanographie et en hydrométéorologie. Les applications des isotopes stables oxygène 18 et deutérium à l'étude de divers aspects du cycle de l'eau dans l'atmosphère sont nombreuses et se développent rapidement. De récentes études ont confirmé l'utilité des données fournies par le réseau pour vérifier et améliorer les modèles de la circulation générale à l'échelle mondiale. Ainsi utilisées, sur le plan tant mondial que régional, ces données devraient permettre d'améliorer notre connaissance actuelle des mécanismes qui régissent les conditions climatiques. Les prévisions de l'évolution du climat dans l'avenir due à des causes naturelles et anthropiques n'en seraient que plus fiables.

Les applications paléoclimatologiques des isotopes stables, plus spécialement de l'oxygène 18, sont aussi abondamment étayées. Lorsqu'on étudie le changement climatique, la distribution des isotopes stables dans les précipitations, déduites des données fournies par le réseau, donne de précieuses indications pour l'interprétation des variations de la

teneur en isotopes lourds des matières étudiées. Cette information est utilisée en rapport avec les relations empiriques bien établies qui existent entre la composition isotopique des précipitations et les paramètres essentiels du climat tels que la température de l'air au sol, l'humidité relative et le volume des précipitations.

Chimie analytique pour les études de la pollution

Les Laboratoires de Seibersdorf s'occupent aussi activement des applications de la chimie analytique à la surveillance des polluants chimiques et organiques de l'environnement provenant de la production d'énergie et d'autres activités.

Cette pollution revêt maintes formes différentes et la radioactivité due aux entreprises humaines n'en est qu'un des aspects particuliers. Le principal composant, quant à ses effets nocifs sur la santé, est constitué par les métaux lourds toxiques. Une étude récente montre que la toxicité annuelle totale de ces métaux en circulation dépasse la toxicité combinée de tous les déchets radioactifs et organiques produits dans le monde chaque année.

Bien que tous les éléments stables (et quelques éléments radioactifs) puissent être présents dans des échantillons biologiques et environnementaux, les concentrations habituelles et le rôle biochimique, toxicologique et physiologique de ces éléments ne sont encore connus que pour certains d'entre eux. Citons les constituants majeurs et mineurs des matrices biologiques, les éléments minéraux, les oligo-éléments essentiels et quelques autres connus pour leurs effets nocifs dans les systèmes biologiques et l'environnement.

Parmi les nombreuses méthodes analytiques dont on dispose, les méthodes nucléaires et apparentées sont particulièrement utiles pour nous renseigner sur la composition de divers échantillons biologiques et environnementaux.

Par exemple, l'analyse par activation neutronique (AAN) permet normalement de détecter la présence de 20 à 30 éléments dans un seul échantillon de sédiment, d'aérosol solide, ou dans une matrice biologique comme les tissus d'une moule. L'émission X induite par particules (EXIP) ou la fluorescence X (FX) permettent aussi de détecter à peu près autant d'éléments. On obtient les meilleurs résultats en combinant ces méthodes ou en les complétant par une autre technique d'analyse multi-élémentaire telle que la voltamétrie ou la spectroscopie d'émission à plasma couplé par induction.

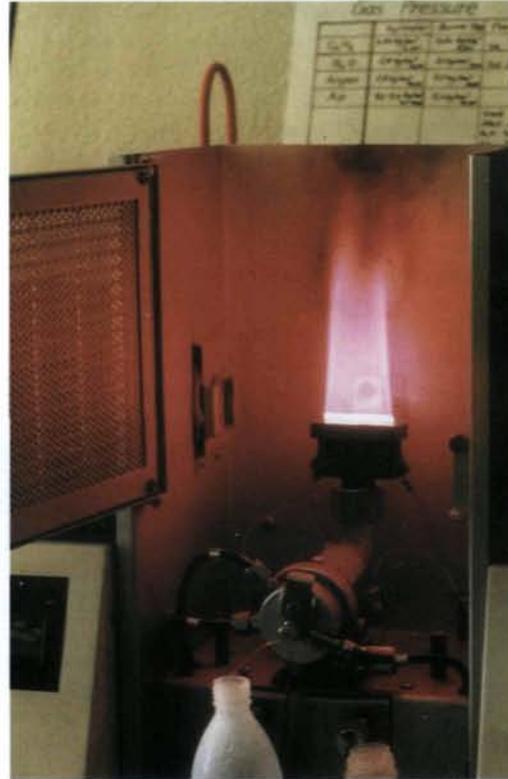
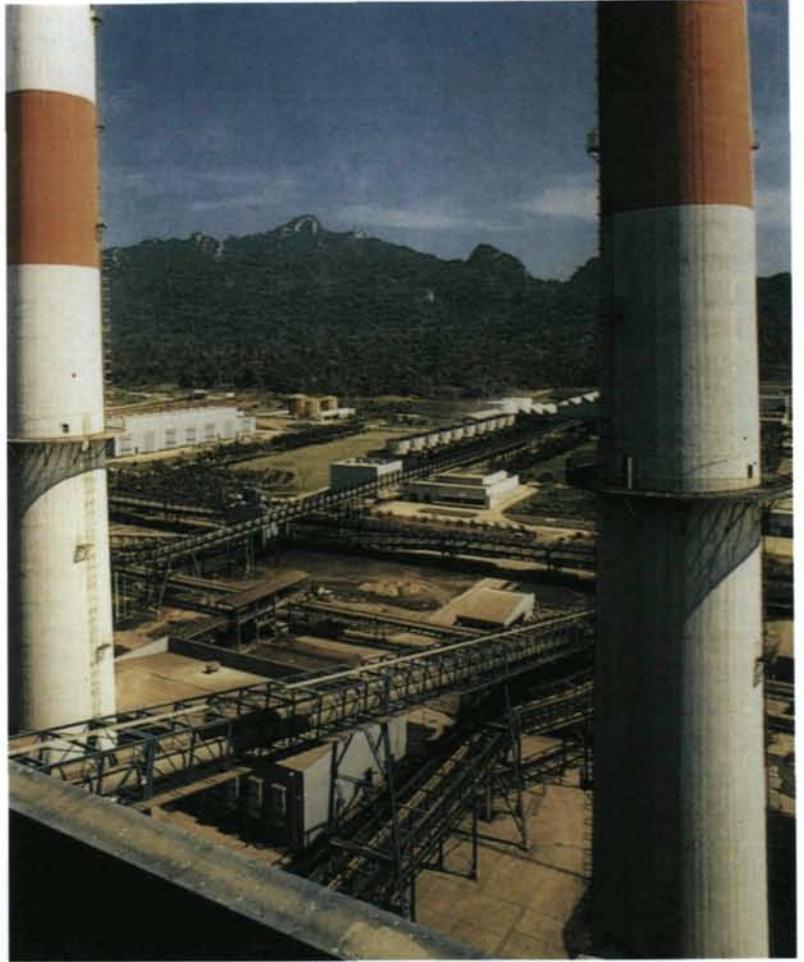
Les techniques analytiques nucléaires ne donnent cependant pas la réponse à toutes les questions que l'on souhaiterait poser quant aux métaux lourds toxiques, mais elles ont de remarquables propriétés qui permettent de détecter les principaux constituants de déchets solides non radioactifs (tels les cendres

volantes de charbon et les schlamms) et de rechercher comment les éléments toxiques et autres éléments traces qu'ils contiennent peuvent passer dans l'environnement.

Ces techniques sont aussi un outil de choix pour plusieurs études importantes de la pollution atmosphérique, lorsqu'il s'agit par exemple de déterminer la composition d'aérosols solides, d'identifier des sources de pollution et d'évaluer le transport à longue distance des polluants atmosphériques. Elles sont également très utiles pour mesurer directement l'exposition de l'être humain aux éléments traces toxiques (due par exemple aux activités professionnelles ou à la consommation d'aliments contaminés).

Il y a des années que la Division des sciences biologiques et la Division des sciences chimiques de l'AIEA, avec l'appui expérimental des Laboratoires de Seibersdorf, participent à des travaux de recherche et de surveillance de ce genre qui sont depuis peu considérés prioritaires dans le cadre du programme de l'Agence à moyen terme (prévu jusqu'en 1998). Les protagonistes sont les centres d'études nucléaires des pays en développement.

Actuellement, les travaux sur la pollution atmosphérique, les déchets solides et l'exposition humaine au mercure sont mis en vedette. Les Laboratoires de Seibersdorf y participent en appliquant les techniques analytiques les plus modernes pour doser les éléments traces dans diverses matières non organiques, dans des substances biologiques et dans les aliments, dans les sols, les roches et les



Diverses techniques nucléaires très sensibles sont utilisées, souvent en combinaison avec d'autres méthodes, pour analyser la pollution provenant de la production d'énergie et autres activités. La traînée rouge qui apparaît sur la photo de droite indique la présence de strontium dans une solution analysée par spectrométrie d'absorption atomique à flamme. La flamme bleue du chalumeau à plasma atteint les températures extrêmement élevées nécessaires à la spectroscopie d'émission à plasma utilisée pour l'analyse des éléments traces présents dans l'atmosphère. (Photos: ADB, Laboratoires de Seibersdorf)

minéraux, ainsi que dans les eaux de pluie et autres eaux naturelles. On recherche aussi les contaminants radioactifs dans les denrées alimentaires et dans des matières de l'environnement. Environ 10 000 analyses sont effectuées chaque année, notamment par activation neutronique, par spectrométrie d'absorption atomique, par spectrométrie d'émission à plasma couplé par induction, par spectrophotométrie en ultraviolet et par fluorimétrie classique et au laser.

Par exemple, dans le cas d'un programme de recherche coordonnée de l'AIEA en cours d'exécution, qui porte sur l'absorption quotidienne par l'être humain des principaux oligo-éléments nécessaires à la nutrition, les Laboratoires de Seibersdorf ont étudié plus de 400 échantillons de régime alimentaire total envoyés par l'Australie, le Brésil, le Canada, la Chine, l'Espagne, les Etats-Unis, l'Iran, l'Italie, le Japon, la Norvège, le Portugal, le Soudan, la Suède, la Thaïlande, la Turquie et l'ex-Union soviétique.

La plupart des pays envoient des échantillons de régime alimentaire provenant de différents secteurs — zones urbaines, industrielles et rurales — et de groupes de population de différents niveaux sociaux. Les dosages portent sur des éléments importants pour la nutrition (sodium, potassium, aluminium, phosphore, calcium, manganèse, chrome, cobalt, fer, cuivre, zinc, sélénium, magnésium) ainsi que sur des éléments potentiellement toxiques (arsenic, cadmium, mercure, plomb).

Ces travaux visent à mieux connaître les taux quotidiens actuels d'absorption des éléments nutritifs et les quantités tolérées d'autres éléments. Cette information peut servir de référence pour noter les déviations, ou de base à des plans d'action.

Les Laboratoires de Seibersdorf étudient aussi les teneurs en radionucléides naturels et artificiels présents dans l'environnement et dans les aliments. Ces travaux ont été très activés en 1990 du fait de la participation des Laboratoires au Projet international sur Tchernobyl organisé par l'AIEA qui fait appel à diverses techniques dont la spectrométrie gamma avec détecteurs à l'iodure de sodium et au germanium, la spectrométrie alpha avec détecteurs au silicium à barrière de surface, la mesure du taux d'émission bêta avec un ensemble à anticoincidence, le comptage par scintillateur liquide, et diverses méthodes chimiques de séparation pour différents radionucléides.

A cette occasion, on a mis en œuvre diverses méthodes recommandées pour le dosage des principaux contaminants radioactifs (césium 134 et 137, strontium 89 et 90, américium, plutonium) présents dans l'air, l'eau, le sol, l'herbe, les denrées alimentaires et diverses matières de référence.

Les Laboratoires ont également fait des analyses pour le compte du réseau de l'OMM chargé de surveiller la pollution atmosphérique naturelle. Les analyses d'échantillons de précipitations et d'aérosols solides étaient faites pour des stations

de 30 pays en développement et recherchaient le sodium, le magnésium, le calcium, le potassium, le zinc, le manganèse, le nickel, le cadmium, le plomb, le cuivre et les anions sulfate et nitrate polluants.

Services de contrôle de la qualité

Les analyses faites à des fins scientifiques doivent être bien étayées et fiables, car les résultats peuvent être le fondement de décisions économiques, administratives, médicales ou juridiques. En outre, lorsqu'il s'agit d'études écologiques, ils doivent être comparables et compatibles à l'échelon national, régional et même mondial. En outre, il se peut que les mesures soient faites par de nombreux laboratoires.

Grâce à son programme de services de contrôle de la qualité des analyses, les Laboratoires de l'AIEA peuvent aider les laboratoires nationaux à vérifier les résultats de leurs travaux. Ces laboratoires utilisent généralement des méthodes analytiques, atomiques et nucléaires pour doser les éléments traces majeurs et mineurs ainsi que les isotopes radioactifs et stables dans des matières nucléaires, environnementales et biologiques.

Le programme comporte une formation portant sur l'assurance de la qualité, la comparaison des méthodes, la préparation des étalons et l'analyse de référence d'échantillons présentés par des laboratoires extérieurs. Le programme se manifeste surtout par les étalons certifiés qu'il distribue aux fins de comparaison.

Ces matières de référence servent surtout à assurer économiquement la qualité des mesures. Le laboratoire qui les prépare peut caractériser tout un lot de matières et en faire profiter tous les laboratoires de mesure participants simplement en leur distribuant des échantillons de ce lot. Cette économie d'efforts, outre la faculté qu'acquiert un laboratoire d'assurer la compatibilité avec les normes internationales, a fait que ces matières étalons sont le moyen préféré de réaliser et de vérifier économiquement la compatibilité des mesures faites par un laboratoire ainsi que la justesse des résultats.

Les services de contrôle de la qualité de l'AIEA disposent actuellement de quelque 35 matières différentes utilisées pour les travaux d'analyse visant à déterminer la qualité de l'environnement et l'impact des activités humaines. Ces matières comprennent des matrices relatives à la lithosphère (sols, végétaux et matières d'origine humaine telles que les cendres volantes et les boues d'égouts) ainsi qu'à l'agriculture et à l'alimentation (sols et phosphates, végétaux, produits laitiers, grains, tissus d'animaux, de poissons et de bivalves).

Un certain nombre de matières de référence ont également été recueillies à l'occasion d'études de l'impact écologique portant sur la qualité de l'air, la fertilisation et les déchets industriels et urbains.

Instrumentation pour l'étude de l'environnement

En matière d'instrumentation et d'électronique nucléaire, les Laboratoires de Seibersdorf participent aussi à des projets qui intéressent l'environnement.

Un système de surveillance des fumées, par exemple, a été conçu et réalisé à Seibersdorf. C'est un dispositif informatisé qui analyse des échantillons gazeux contenant des particules radioactives, de l'iode et des gaz nobles rejetés par les cheminées des centrales et autres installations nucléaires. L'équipement de surveillance comporte un détecteur de particules et un détecteur d'iode placés dans une cellule d'échantillonnage blindée, un détecteur de gaz nobles installé à l'intérieur de la cheminée, une pompe à vide, un débitmètre d'air, des vannes de régulation, un contrôleur logique programmable, des amplificateurs, un analyseur temporel à une voie et des alimentations haute tension. L'ordinateur a pour fonctions le comptage, l'acquisition et le traitement des données, leur présentation, leur enregistrement, et l'affichage des résultats.

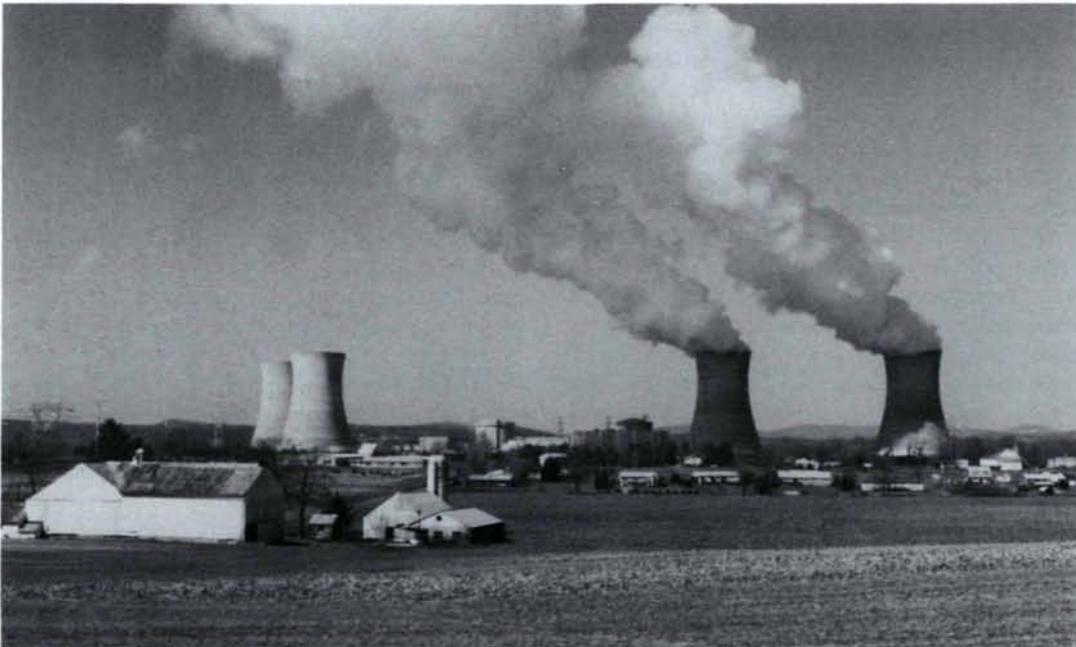
Ce système de surveillance a déjà été utilisé en Grèce et au Portugal.

Les Laboratoires de l'AIEA s'occupent également de la mise au point de méthodologies et d'applications de l'analyse par fluorescence X, techniques qui consistent à mesurer les énergies et les intensités des rayons X caractéristiques qu'émet un échantillon excité par un rayonnement électromagnétique. C'est une méthode simple et efficace adoptée depuis longtemps pour l'analyse des aérosols solides et des matières solides en suspension dans les eaux naturelles et les boues.

A la demande de certains Membres de l'AIEA, les Laboratoires s'occupent aussi d'un système d'alarme pour la surveillance radiologique de l'environnement en Europe et au Moyen-Orient, prévu pour alerter promptement les autorités en cas de dégagement de radioactivité provenant d'un accident nucléaire.

Un des principaux éléments du système est le poste avancé capable de retransmettre automatiquement au poste central le signal d'un détecteur de rayonnement par l'intermédiaire du réseau téléphonique public ou par télex. Au poste central, un ordinateur collecte et traite l'information reçue des postes avancés, communique la distribution de la radioactivité aux autorités compétentes et déclenche l'alarme lorsque la radioactivité dépasse la limite fixée.

Les spécialistes de Seibersdorf étudient actuellement un logiciel universel pour l'ordinateur de la station centrale qui puisse desservir un réseau comprenant plusieurs postes de surveillance avancée.



Les Laboratoires de Seibersdorf ont mis au point un système de surveillance des fumées des centrales nucléaires et autres installations.