

Applications scientifiques et industrielles des accélérateurs au Moyen-Orient et en Europe

De nombreux pays appliquent des techniques avancées faisant appel à des accélérateurs de faible énergie, mais tous n'en tirent pas pleinement parti

par
Vlado Valkovic
et
Wiktor
Zyszkowski

Conçues à l'origine pour la recherche fondamentale en physique, les machines que l'on désigne sous le nom générique d'accélérateurs de particules sont aujourd'hui couramment utilisées dans les domaines de la science, de l'industrie, de la médecine, de la protection de l'environnement et dans d'autres secteurs.

Bien qu'il existe toutes sortes d'accélérateurs, ceux qui produisent des faisceaux d'énergie relativement faible comptent maintenant parmi les outils d'analyse nucléaire les plus puissants. Ces accélérateurs sont notamment utilisés pour effectuer des analyses scientifiques très sensibles d'éléments traces dans le cadre d'études sur la pollution atmosphérique, ou dans le domaine de la santé.

Malgré la diversité de ses applications pratiques, cette technologie de haut niveau n'a pas encore réussi à s'implanter solidement dans la plupart des pays en développement, ce qui contraste vivement avec la situation que l'on peut observer dans le monde industrialisé. Afin de réduire ce retard technologique, et compte tenu des avantages économiques et sanitaires que l'on peut tirer des applications des accélérateurs de faible énergie, l'AIEA a lancé un projet régional en 1993 dans le cadre de ses programmes d'assistance et de coopération techniques.

Ce projet, qui concerne l'application de ces accélérateurs dans le domaine des sciences et de l'industrie, vise à coordonner les efforts des pays intéressés de la région Moyen-Orient et Europe, et complète un certain nombre de projets nationaux distincts dans ce domaine.

Le présent article donne un bref aperçu des applications courantes des accélérateurs de faible

énergie et décrit les travaux menés dans le cadre de projets nationaux et régionaux de l'AIEA auxquels participent des pays du Moyen-Orient et d'Europe. Plus de vingt pays comptent prendre part au projet régional.

Le projet régional traite certains problèmes fondamentaux concernant les relations entre le transfert effectif des techniques et le développement scientifique et industriel. Dans les pays industrialisés, le lien entre les établissements scientifiques et l'industrie est généralement solide, et les politiques de développement sont bien en place. En revanche, ce n'est pas le cas dans de nombreux pays en développement, et cet handicap peut empêcher ces pays de récolter les bénéfiques pratiques de techniques avancées. Le projet régional cherche à les aider à tisser ces liens indispensables et à mettre en place des politiques efficaces. A cet égard, il convient de garder présent à l'esprit que les techniques nouvelles d'aujourd'hui seront les techniques classiques de demain; les pays doivent donc s'employer avec soin et discernement à renforcer leurs capacités scientifiques et industrielles dans des domaines susceptibles de leur donner un avantage sur leurs concurrents.

Les applications des accélérateurs

Les accélérateurs et leurs produits sont utilisés dans la quasi-totalité des branches que recouvrent l'industrie de haute technologie et la médecine moderne. Quelques applications représentatives des accélérateurs de faible énergie — c'est-à-dire, pour la plupart, des cyclotrons, des machines électrostatiques (Van de Graaff ou équivalent) et des accélérateurs linéaires (LINAC) — sont brièvement décrites ci-après.

Des outils d'analyse. Dans de nombreux domaines, plusieurs techniques d'analyse puissantes faisant appel à la technologie des accélérateurs ont

M. Valkovic est chef du Laboratoire de physique, de chimie et d'instrumentation des laboratoires de l'AIEA à Seibersdorf (Autriche). M. Zyszkowski travaille au Département de la coopération technique de l'AIEA. Des références techniques complètes peuvent être obtenues auprès des auteurs.

eu des retombées impressionnantes (voir figure). Il s'agit notamment des techniques PIXE (émission X induite par des particules), RBS (rétrodiffusion de Rutherford), NRA (analyse par réaction nucléaire), PESA (diffusion élastique de particules), PIGE (émission gamma induite par des particules), CM (microscopie par canalisation), STIM (microscopie ionique à transmission et à balayage) et SEM (microscopie électronique secondaire).

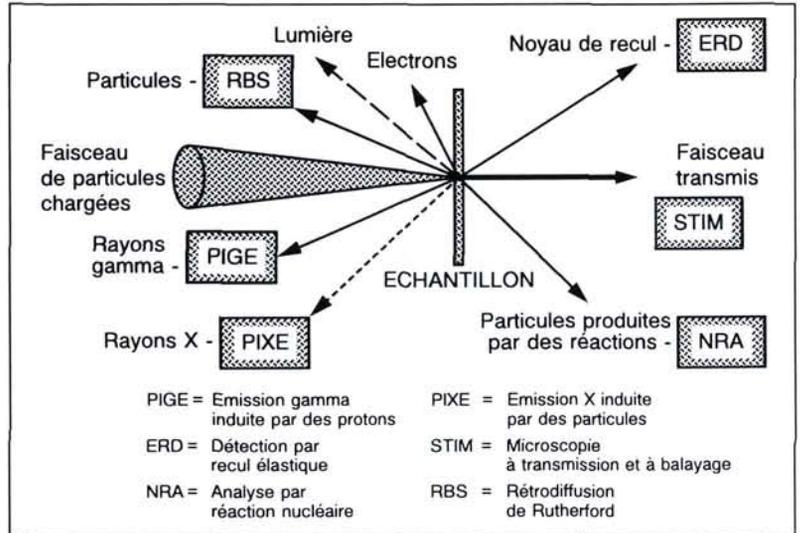
La combinaison adéquate des produits de réaction détectés peut fournir des informations sur la composition élémentaire totale correspondant à la morphologie de l'échantillon. Le balayage à l'aide de faisceaux ioniques de très petite taille a transformé ces techniques d'analyse en outils d'imagerie qui constituent de véritables microscopes nucléaires, car ils permettent de visualiser la répartition des éléments.

Une autre technique, la spectrométrie de masse par accélérateur (AMS), utilise un accélérateur et son système de transport de faisceaux pour effectuer des analyses ultrasensibles. Cette technique permet de détecter la présence dans des échantillons (de l'ordre du mg) de radio-isotopes à longue période (béryllium 10, carbone 14, aluminium 26, chlore 36, calcium 41, iode 129) dont les rapports isotopiques sont de l'ordre de 10^{-15} à 10^{-16} . L'emploi de la technique AMS est agréé dans plus de 30 laboratoires à travers le monde.

Les applications de cette technique sont nombreuses, par exemple, dans les domaines de l'archéologie, de l'art, de la paléanthropologie, de la géologie, de la paléoclimatologie, de la minéralogie des corps extraterrestres et de la biologie. Elle est ainsi employée dans la plupart des datations au carbone radioactif, car elle est bien plus sensible que la méthode plus classique de comptage des désintégrations bêta du carbone 14.

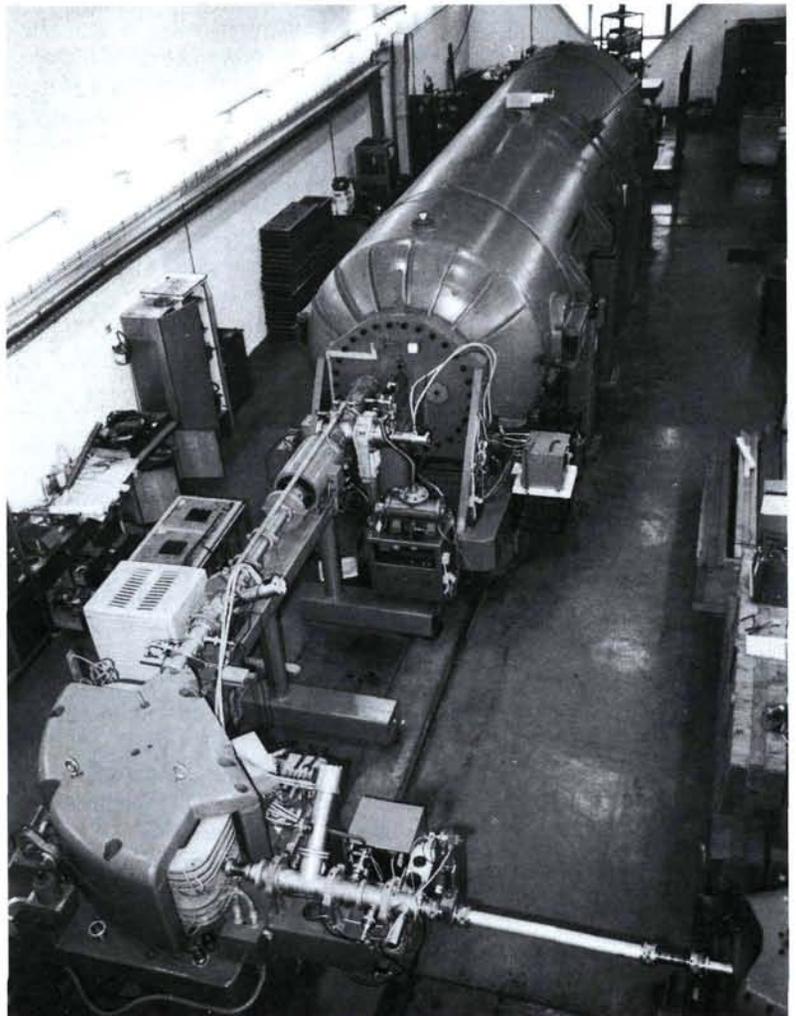
Les accélérateurs dans les sciences de la vie et en médecine. Les faisceaux de particules produits par des accélérateurs peuvent être employés dans des établissements médicaux à des fins diagnostiques et thérapeutiques. Les applications diagnostiques consistent notamment à recourir à des techniques nucléaires pour effectuer des analyses élémentaires, et à utiliser différents radio-isotopes et en particulier des émetteurs de positons. Les applications thérapeutiques ne se limitent pas à la seule radiothérapie. Elles recouvrent également une vaste gamme d'activités allant de l'utilisation de matières spéciales aux applications chirurgicales.

L'analyse des niveaux de concentration d'éléments traces dans les liquides et les tissus organiques présente de belles perspectives pour les tests cliniques. Les techniques faisant appel aux accélérateurs offrent une solution très intéressante à cet égard car elles sont à même de détecter simultanément plusieurs éléments traces dans de très petits échantillons (biopsies, cheveux, sang, etc.). Il serait sans doute difficile de trouver un domaine où le développement des accélérateurs a eu un impact



Bombarder un échantillon à l'aide de faisceaux de particules chargées déclenche un certain nombre de processus. Tous peuvent être utilisés pour obtenir des informations sur cet échantillon et on a mis au point, à partir de certains d'entre eux, des techniques d'analyse nucléaire agréées.

Photo: Accélérateur tandem Van de Graaff, offert par la Rice University de Houston, Texas (Etats-Unis) à l'Institut Ruder Boskovic de Zagreb (Croatie).



aussi fort qu'en médecine, et en particulier en médecine nucléaire et en radiothérapie. Un cyclotron peut produire une gamme de radio-isotopes à usage médical que l'on ne peut obtenir au moyen d'un réacteur nucléaire. Ces radio-isotopes peuvent aider à mieux comprendre les processus qui régissent les maladies humaines. Certains radio-isotopes ont de très courtes périodes, qui se mesurent en minutes, et doivent par conséquent être produits à proximité du lieu d'utilisation. Les radionucléides le plus souvent utilisés en tomographie à émission de positons (TEP) sont le carbone 11, l'azote 13, l'oxygène 15 et le fluore 18.

Outre les rayonnements classiques, tels que les rayons gamma ou X produits par des accélérateurs d'électrons linéaires, plusieurs centres utilisent des techniques de radiothérapie neutronique et protonique. Une douzaine d'établissements, qui mènent à l'heure actuelle des recherches sur la radiothérapie protonique, font état de résultats supérieurs pour certaines maladies. De plus, des installations de traitement par ions lourds seront bientôt disponibles dans plusieurs établissements. Avec des faisceaux d'ions lourds, la distribution de la dose en fonction de la profondeur est intéressante et on peut envisager des applications neurochirurgicales.

Accélérateurs et sciences des matériaux. L'emploi d'accélérateurs pour la modification des matériaux et l'analyse ultérieure des résultats se développe rapidement. De nombreuses applications des techniques d'implantation d'ions sont passées des laboratoires de recherche à l'industrie. L'un des exemples les plus remarquables est le développement de l'implantation d'ions pour améliorer la résistance à l'usure des prothèses.

Il est largement admis que l'introduction de techniques perfectionnées de traitement et d'usinage qui permettent de créer de nouveaux matériaux en descendant jusqu'au niveau de l'atome et de la molécule va déclencher une nouvelle révolution industrielle. Celle-ci pourrait être le fait de techniques faisant appel aux accélérateurs, grâce au développement de faisceaux d'ions de haute énergie focalisés, groupés et à large gamme.

On procède, dans un nombre croissant d'accélérateurs de particules chargées, à la modification et à l'analyse de différents matériaux à l'aide de faisceaux d'ions d'une énergie de l'ordre du mégaelectronvolt (MeV). Les travaux menés portent notamment sur l'implantation d'ions et le traitement, la synthèse de films minces et les modifications de surface, la fabrication de biomatériaux, l'étude des phénomènes de corrosion et d'érosion, les mesures de profils de concentration et les études sur les phénomènes de diffusion.

A l'heure actuelle, au moins cinq entreprises dans le monde disposent de systèmes d'implantation d'ions de haute énergie. Tous sont conçus pour accélérer des ions lourds à charge simple ou double

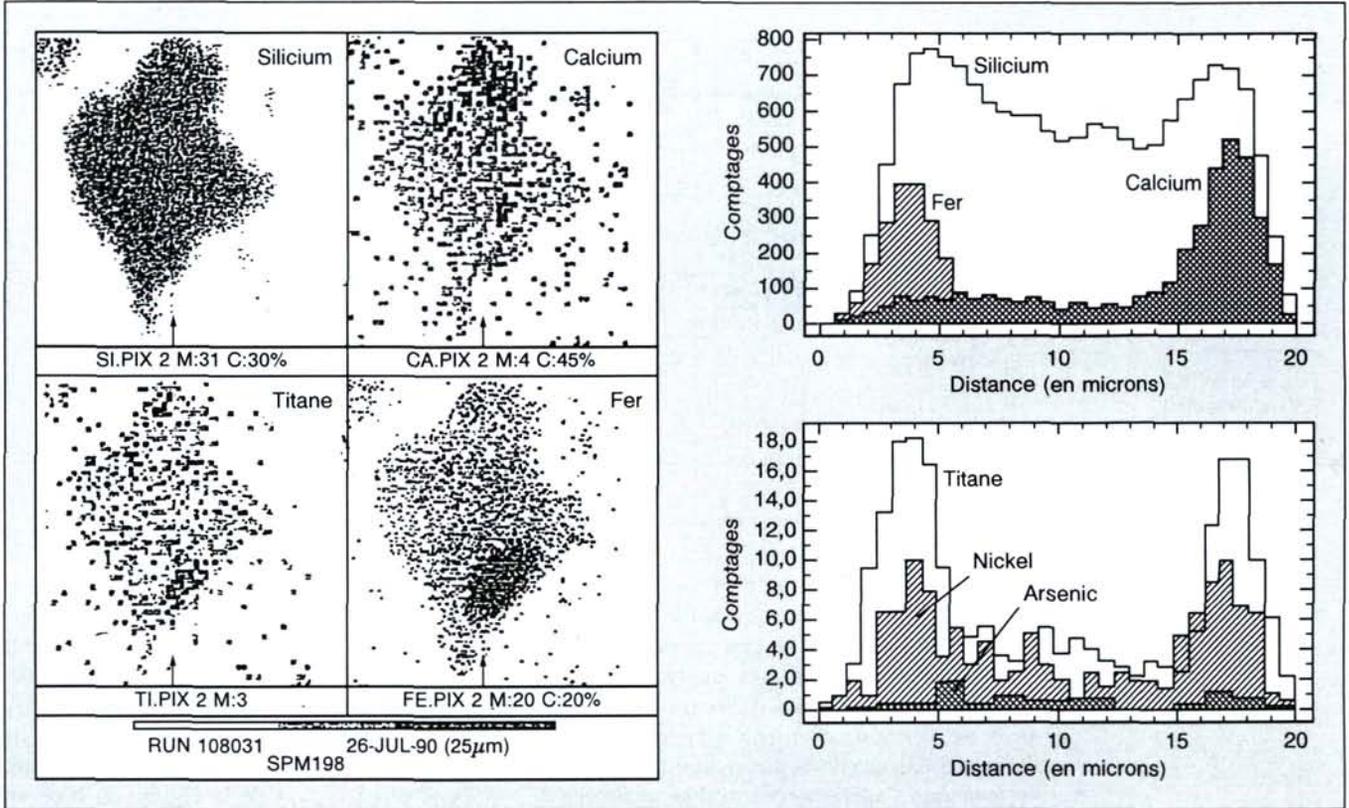
tels que le bore, l'azote, le phosphore, l'arsenic et l'antimoine. En contrôlant l'énergie du faisceau, on peut utiliser ces systèmes pour traiter des matériaux à la profondeur souhaitée. Ainsi, il est par exemple possible d'obtenir à partir de matériaux ordinaires des multicouches de très haute qualité ou des couches superficielles modifiées multifonctionnelles.

Les accélérateurs et la protection de l'environnement. Des techniques d'analyse faisant appel à des accélérateurs sont utilisées pour surveiller la pollution de l'environnement et identifier les sources de cette pollution. Parce qu'elles peuvent traiter plusieurs éléments et qu'elles sont à même de mesurer des profils de concentration, ces techniques sont largement employées dans les études de la pollution atmosphérique. (*Voir graphiques.*)

L'utilisation du charbon pour la production d'électricité et le chauffage reste l'une des principales sources de pollution de l'air, malgré les améliorations apportées au procédé de combustion et l'emploi de dispositifs d'épuration des gaz, tels que des dépoussiéreurs électrostatiques (et des accélérateurs d'électrons). De plus, les dépoussiéreurs électriques peuvent ne pas être très efficaces lorsqu'il s'agit de collecter des particules d'une taille de l'ordre de 0,1 à 1,0 micromètre. Or, ces particules ont un temps de séjour atmosphérique plus long et des effets sur la santé et la qualité de l'air plus importants qu'une masse équivalente de particules plus grosses. Elles présentent des concentrations superficielles d'éléments traces potentiellement toxiques anormalement élevées, qui augmentent à mesure que la taille de la particule décroît, du fait des mécanismes de formation de cendres volantes.

Les accélérateurs dans l'industrie. Autre application digne d'intérêt : la lithographie par projection d'ions. L'industrie de la micro-électronique a besoin que soient développés des systèmes lithographiques d'une précision inférieure à 0,3 micromètre pour des circuits, à base de silicium, et d'une précision inférieure à 0,1 micromètre pour des circuits à structure hétérogène et des circuits à couplage quantique. La lithographie par projection d'ions est peut-être en mesure de répondre à ces spécifications rigoureuses, n'ayant pas les mêmes limites que les méthodes lithographiques optiques et à rayons.

Les pays industrialisés ont pris conscience du potentiel des techniques faisant appel aux accélérateurs. Ainsi, l'Allemagne possède 23 accélérateurs électrostatiques, dont neuf sont des tandems dotés de montages expérimentaux pour l'évaluation des profils d'hydrogène, l'analyse par RBS, l'implantation d'ions, la canalisation, les microsondes et l'AMS. Dans nombre de ces installations, plus de 50% du temps d'exploitation est consacré à la recherche appliquée. En outre, il y a 16 cyclotrons, dont certains sont conçus exclusivement pour la production d'isotopes et au moins trois sont équipés pour



Dans le cadre des études sur la pollution atmosphérique, il est possible d'utiliser des techniques faisant appel aux accélérateurs (à savoir les méthodes PIXE et RBS) pour caractériser des particules de cendres volantes en mesurant leurs teneurs en éléments et en indiquant les profils de concentrations.

la TEP et 11 cyclotrons et accélérateurs linéaires principalement employés pour l'accélération d'ions lourds. Au Japon, les applications médicales des accélérateurs occupent à elles seules 13 cyclotrons équipés pour la TEP, des accélérateurs d'ions lourds, et plus de 500 accélérateurs linéaires utilisés à des fins thérapeutiques.

Projets nationaux appuyés par l'AIEA

Au cours des 15 dernières années, un certain nombre de projets mettant en œuvre des technologies faisant appel aux accélérateurs ont été inscrits au programme d'assistance technique de l'AIEA pour le Moyen-Orient et l'Europe. Plusieurs laboratoires en Albanie, en Bulgarie, en Croatie, en Grèce, en Hongrie, en Iran, en Jordanie, en Pologne, au Portugal et en Roumanie, pour ne citer que ces pays, ont reçu une assistance dans le cadre de projets nationaux ayant pour objectif de moderniser ou de créer des laboratoires équipés d'accélérateurs. Grâce à des fonds importants en monnaies non convertibles, l'AIEA a fourni, à la fin des années 70 et au début des années 80, des accélérateurs d'origine soviétique à la Bulgarie, à la Hongrie, à la Pologne et au Portugal, notamment.

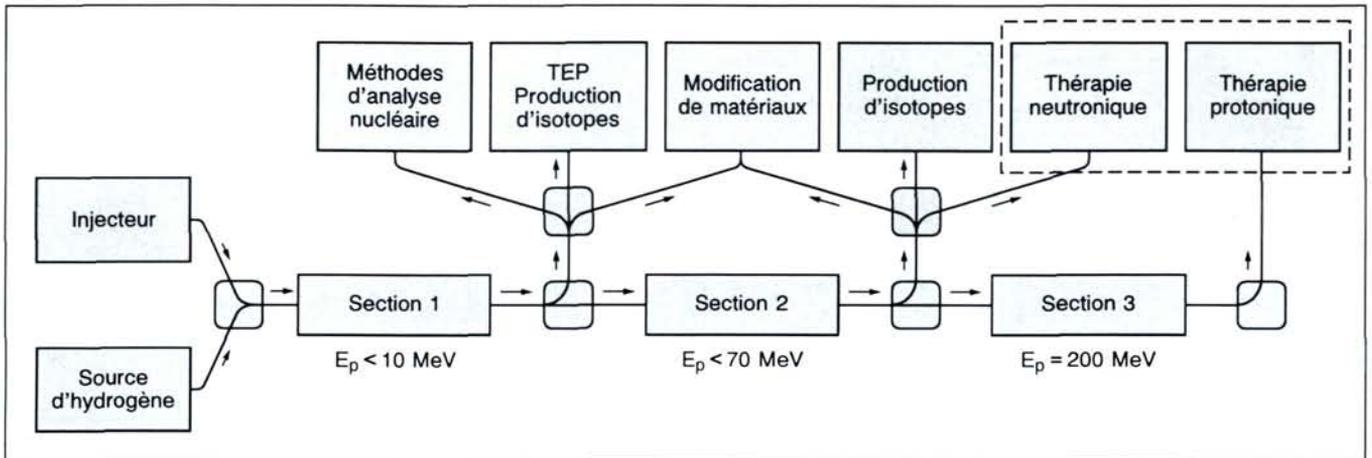
En Hongrie, un laboratoire national à Debrecen a reçu un cyclotron qui a été mis en service en 1985.

On l'utilise aujourd'hui de façon intensive pour la recherche fondamentale en physique atomique et nucléaire et pour des applications industrielles, agricoles et médicales, notamment la production d'isotopes. Ce laboratoire, qui est devenu l'un des meilleurs de la région, fournit des experts et organise des réunions, des séminaires ainsi que des activités de formation individuelle ou collective.

En Bulgarie, l'AIEA fournit une aide depuis 1984 en vue de créer un laboratoire doté d'un accélérateur à l'Institut de technologie chimique de Burgas.

L'objectif est d'appuyer les applications dans les industries de la pétrochimie et de la fabrication de câbles. Un accélérateur d'électrons a été installé en 1991. On compte que ce projet permettra à la Bulgarie de produire des matériaux d'isolation de câbles résistant mieux à la chaleur ainsi que de nouveaux matériaux d'emballage, et de réduire ainsi la quantité d'articles de ce genre qu'elle doit importer.

En Pologne, l'Institut de chimie et de technologie nucléaires de Varsovie a reçu l'aide de l'AIEA pendant ces dix dernières années. Dès le début, on a fourni un accélérateur d'électrons pilote et quelques équipements auxiliaires provenant de l'ex-Union soviétique. A l'heure actuelle, cet accélérateur est notamment utilisé pour la production pilote de tubes et de bandes thermorétractables.



Représentation schématique d'un accélérateur à trois sections destiné à des applications hospitalières classiques.

Un projet de tout premier plan a été lancé en Pologne en 1987 dans le même établissement. Ce projet porte sur la purification des gaz de combustion des centrales électriques au charbon en Pologne à l'aide de faisceaux d'électrons. A partir de deux accélérateurs d'origine soviétique, on a réalisé une installation de démonstration à Varsovie, et on est en train d'appliquer cette technique sur une plus grande échelle dans la région de Szczecin. On s'attend à ce qu'elle ait des effets positifs sur l'environnement en permettant l'élimination efficace et simultanée de polluants gazeux (SO_2 et NO_x). Ce projet est généreusement appuyé par des contributions des Etats-Unis et du Japon et il est devenu, à bien des égards, un projet modèle. Un certain nombre d'autres pays de la région ou d'ailleurs se sont déclarés intéressés par cette technologie, et un soutien continu sera nécessaire.

En Albanie, en Croatie, en Grèce, en Iran, au Portugal et en Roumanie, l'aide de l'Agence a contribué à moderniser les installations expérimentales de laboratoires équipés d'accélérateurs Van de Graaff. A l'Institut Ruder Boskovic de Zagreb, les efforts actuellement déployés dans le cadre de ce projet visent à moderniser un accélérateur déjà installé afin de pouvoir mener des travaux de micro-analyses. A l'heure actuelle, cet accélérateur est notamment utilisé pour le développement de techniques d'analyse nucléaire, pour des études sur les éléments traces dans le charbon, dans des échantillons biomédicaux et dans d'autres matières, et pour des recherches concernant les réactions nucléaires et la dosimétrie.

Au centre Demokritos d'Athènes, en Grèce, un laboratoire doté d'un accélérateur va recevoir un goniomètre dans le cadre d'un projet financé par les Etats-Unis. Cela permettra de nouvelles applications en science des matériaux et dans d'autres domaines. De même, au Portugal, l'accélérateur Van de Graaff existant a été équipé pour des recher-

ches en physique atomique et en physique des solides. Les principaux articles qui ont été fournis sont un ordinateur, un analyseur multicanal, un détecteur à semi-conducteur et une chambre à vide. A l'aide notamment des techniques PIXE et RBS, des études ont été entreprises sur des échantillons biologiques, des aérosols et des circuits au silicium.

Dans certains pays de la région, on note un intérêt croissant pour les applications des cyclotrons en radiothérapie moderne. En Iran, un laboratoire équipé d'un cyclotron est en construction et l'Agence fournit des conseils, des connaissances spécialisées, des services de formation et du matériel. Cette installation est destinée à des applications médicales (la production de radio-isotopes tels que le thallium 201, le gallium 67 et l'iode 123, et le recours futur à la PET) ainsi qu'à la recherche en physique nucléaire. Un projet similaire est envisagé en Turquie, où l'Agence aide les autorités à mener une étude de faisabilité.

L'emploi d'accélérateurs linéaires a également été encouragé. Au Portugal, par exemple, le Laboratoire de Engenharia e Tecnologia Industrial a été équipé d'un accélérateur à faisceaux d'électrons d'origine soviétique pour appuyer des travaux de recherche-développement sur des procédés prometteurs, comme le traitement par irradiation des revêtements de surface et la réticulation ou la polymérisation radio-induites des matières plastiques telles que celles utilisées pour le gainage des câbles.

A l'Institut Ruder Boskovic de Zagreb, l'AIEA appuie l'installation d'un accélérateur linéaire offert par l'Allemagne tandis qu'en Pologne elle a fourni du matériel à l'Institut de radiologie et de chimie appliquées de l'Université technique de Lodz, qui possède un accélérateur linéaire. Les travaux de l'Institut portent notamment sur la recherche appliquée en chimie des polymères, la synthèse de composés marqués, l'étude de matières

biologiques et bioactives, et la stérilisation industrielle de produits médicaux.

En outre, presque tous les pays de la région se sont intéressés à l'irradiation des aliments par faisceaux d'électrons dans le cadre d'un projet régional distinct de l'AIEA. Toutefois, seule la Pologne a décidé de construire une telle installation, et l'Agence a appuyé la construction d'un accélérateur.

Besoins et initiatives dans la région

Malgré la diversité des projets d'assistance technique nationaux, tous les pays n'ont pas pu recourir dans la pratique aux techniques faisant appel aux accélérateurs. Les projets qui ont le mieux réussi sont ceux pour lesquels on disposait déjà de l'infrastructure nécessaire et d'un soutien local. Les projets hongrois et polonais en sont d'excellents exemples. A l'opposé, on trouve un certain nombre d'autres pays, tels que la Turquie, la Syrie et Chypre, qui n'avaient que peu ou pas d'expérience de ce type de technologies. Leur situation illustre les difficultés inhérentes à la mise en place de projets pluriannuels efficaces et montre qu'une phase préparatoire solide au cours de laquelle des décisions doivent être prises sur le financement est indispensable pour entreprendre des projets de grande envergure efficaces.

Qu'il s'agisse de planifier des projets utilisant des accélérateurs ou de promouvoir une coopération efficace entre les différents participants, une base de données serait bien utile. Or, contrairement à ce qui se passe pour les réacteurs de puissance et les réacteurs de recherche, par exemple, on manque d'informations complètes sur les accélérateurs et sur leurs applications, tant au niveau régional qu'au niveau mondial. L'AIEA a entrepris de constituer une base de données sur les accélérateurs de faible énergie (de 100 keV à 100 MeV). Bien qu'une enquête mondiale soit prévue à cet effet, la première étape consistera en une étude pilote pour la région Moyen-Orient et Europe, et un questionnaire a été envoyé aux Etats Membres de l'AIEA de la région.

En janvier 1993, l'AIEA a lancé en outre un projet régional pour le Moyen-Orient et l'Europe consacré aux accélérateurs de faible énergie et à leurs applications scientifiques et industrielles. Ce projet a deux objectifs principaux :

- Promouvoir l'utilisation d'accélérateurs d'ions de faible énergie à des fins industrielles grâce à une coopération régionale et au transfert de méthodes et de techniques récentes, des pays avancés aux pays en développement;
- Promouvoir l'emploi de techniques d'analyse faisant appel aux accélérateurs dans les études environnementales et biomédicales par le biais d'une coopération régionale et familiariser un plus

grand nombre de spécialistes de la région avec les techniques utilisées dans les pays avancés.

Le plan de travail de ce projet comprend trois tâches fondamentales: la première consiste à recueillir et à traiter des données sur les accélérateurs disponibles dans la région. Il s'agirait notamment de rassembler des informations sur le lieu, le type et les paramètres de chaque installation, ainsi que de recenser les compétences disponibles dans la région, les domaines d'intérêt commun et les besoins en matière de formation.

La seconde tâche vise à améliorer les capacités scientifiques par le biais d'une série d'ateliers consacrés à des sujets tels que la préparation d'échantillons pour des techniques d'analyse faisant appel à des accélérateurs, l'emploi de ces techniques dans la prospection et l'exploration minérales, les logiciels requis pour l'évaluation des spectres X et gamma et des spectres de particules chargées, et les exercices d'interétalonnage, entre laboratoires participants. Des ateliers sur d'autres sujets sont également envisagés.

La troisième tâche se rapporte à la promotion de techniques faisant appel aux accélérateurs pour des applications spécifiques dans l'industrie. Des ateliers sont prévus à l'intention de scientifiques, de spécialistes des accélérateurs, de cadres de l'industrie et de décideurs. A cette fin, on fera appel à l'expérience et au savoir-faire de laboratoires de pointe de la région — tels que les Laboratori Nazionali di Legnaro à Padoue (Italie) — pour promouvoir le transfert de technologie. Afin de conseiller les pays désireux de mener des études de faisabilité détaillées, l'AIEA envisage également la préparation d'un manuel sur le sujet.

En résumé, le nouveau projet régional de l'AIEA devrait contribuer à mieux faire connaître les techniques faisant appel aux accélérateurs et à instaurer une collaboration plus étroite entre les pays qui s'intéressent à l'application de ces techniques. Un certain nombre de projets nationaux appuyés par l'AIEA dans ce domaine ont déjà eu un impact positif dans la région, notamment ceux dont l'objet est d'établir de nouveaux centres dotés d'un accélérateur (cyclotron) pour des applications médicales et scientifiques. On espère que ces initiatives renforceront les liens entre les établissements scientifiques et l'industrie et aideront les pays en développement à définir des politiques appropriées qui tiennent compte des relations entre la science, la recherche-développement et le transfert de technologie. Ainsi, de nouvelles possibilités s'offriront aux pays du Moyen-Orient et de l'Europe d'appliquer efficacement des techniques avancées pour promouvoir leur développement social et économique.