

Les radio-isotopes et les rayonnements dans l'industrie

Quelques techniques peu connues mais couramment utilisées dans l'industrie

par Jacques Guizerix, Vitomir Markovic et Peter Airey

Les rayonnements sont utilisés par l'industrie dans des procédés consistant à provoquer des modifications chimiques, physiques et biologiques de l'objet traité. Quant aux isotopes, sous forme de sources scellées ou d'indicateurs, ils servent à obtenir des signaux physiques mesurables correspondant aux propriétés étudiées.

On peut citer d'innombrables exemples de ces applications: par exemple l'industrie du papier et de l'acier emploie des milliers de jauges nucléaires pour optimiser la qualité des produits et le rendement des procédés grâce à la surveillance en continu du poids du papier par unité de surface ou de l'épaisseur des feuillards d'acier. Des dizaines de milliers de jauges de niveau permettent de faire des mesures bien souvent dans des conditions difficiles, dans des milieux corrosifs notamment, ou offrent un moyen simple, fiable et peu onéreux plus intéressant que les appareils non nucléaires. Citons encore l'analyse non destructive pratiquée dans le monde entier et la gammagraphie utilisée en combinaison avec des procédés non nucléaires par tous les laboratoires modernes de cette spécialité.

Bon nombre de ces applications qui font appel à des sources scellées plus ou moins radioactives — de quelques millicuries jusqu'à plusieurs curies* — sont bien connues du public. Nous présentons dans cet article diverses utilisations des rayonnements et des radioindicateurs qui sont peut-être moins connues, bien qu'elles soient couramment utilisées avec profit dans l'industrie.

Applications industrielles des rayonnements

Dans leurs applications industrielles, les techniques d'irradiation contribuent à la production dans la même mesure que les autres procédés industriels. C'est pourquoi, tant l'énergie — qui assure une pénétration suffisante dans le produit — que la puissance — qui assure un rythme de production suffisant — jouent un rôle essentiel. D'autres caractéristiques de ces techniques ont également leur importance, tels la fiabilité (généralement au moins 90% de l'utilisation), la surveillance des opérations, le rendement et la sûreté.

Divers types de sources de rayonnement répondent à ces besoins. On peut affirmer que la technologie et l'ingénierie des sources de rayonnement peut satisfaire

aujourd'hui pratiquement à toutes les exigences de l'industrie. Les sources utilisées sont essentiellement le cobalt 60, isotope radioactif servant à l'irradiation gamma, et les accélérateurs à faisceaux d'électrons de haute énergie, entre 0,15 et 10 mégaelectronvolts (MeV).

Sources et techniques d'irradiation gamma. Le cobalt 60 est pratiquement la seule source utilisée et le sera sans doute longtemps encore, car le césium 137 que l'on a un moment considéré comme un rival possible n'existe pas en quantité suffisante pour répondre aux besoins. Bien qu'un irradiateur industriel utilisant cet isotope ait été récemment utilisé aux Etats-Unis, il est peu probable que l'on en mette beaucoup d'autres en service au cours des dix prochaines années.

Le rayonnement gamma du cobalt 60 est très pénétrant et convient donc très bien aux traitements des produits en vrac et emballés. Il est principalement utilisé pour stériliser les articles médicaux jetables et, dans une moindre mesure, les produits pharmaceutiques, les épices et autres denrées.

Environ 140 radiostérilisateurs industriels sont actuellement en service dans quelque 40 pays. La radioactivité installée totale est d'environ $3,10^{18}$ becquerels (Bq), soit 80 mégacuries (MCi). Un irradiateur industriel de type courant, doté d'une source de $3,7 \times 10^{16}$ Bq (1 MCi), a une puissance d'irradiation d'environ 15 kW et peut stériliser, sous un débit de dose de 2 Mrad, de 25 000 à 30 000 m³ de matières par an. Il existe des installations d'une activité installée totale atteignant $2,2 \times 10^{17}$ Bq (6 MCi ou 90 kW).

Parmi les autres applications, il faut mentionner l'irradiation des denrées alimentaires (plusieurs irradiateurs industriels et quelques installations plus petites pour les démonstrations), la désinfection des boues provenant du traitement des eaux usées (une installation industrielle en République fédérale d'Allemagne) et plusieurs installations pilotes ainsi qu'un certain nombre d'installations de petite taille ou spécialisées, par exemple pour la fabrication de composés bois-polymère, la polymérisation, la greffe sous rayonnement des cloisons de batteries, certaines applications médicales, et la vulcanisation du latex.

Technologie des faisceaux d'électrons. L'usage industriel des faisceaux d'électrons a commencé dans les années 50 avec la réticulation des pellicules de polyéthylène rétrécissables à la chaleur et utilisées comme emballage, et la production d'isolants pour fils électriques. Cette application est en pleine expansion. A

M. Guizerix est chef de la Section des applications industrielles et de la chimie, Division des sciences physiques et chimiques, dont M. Markovic fait également partie. M. Airey est membre de la Division de l'assistance et de la coopération techniques de l'AIEA.

* Le curie est une unité de mesure de la radioactivité correspondant à 37×10^9 désintégrations par seconde; il équivaut à 37 gigabecquerels (37 GBq).

l'heure actuelle, des centaines d'accélérateurs à faisceau d'électrons sont utilisés à diverses fins dans l'industrie. Deux sortes d'accélérateurs et d'applications ont été mises au point:

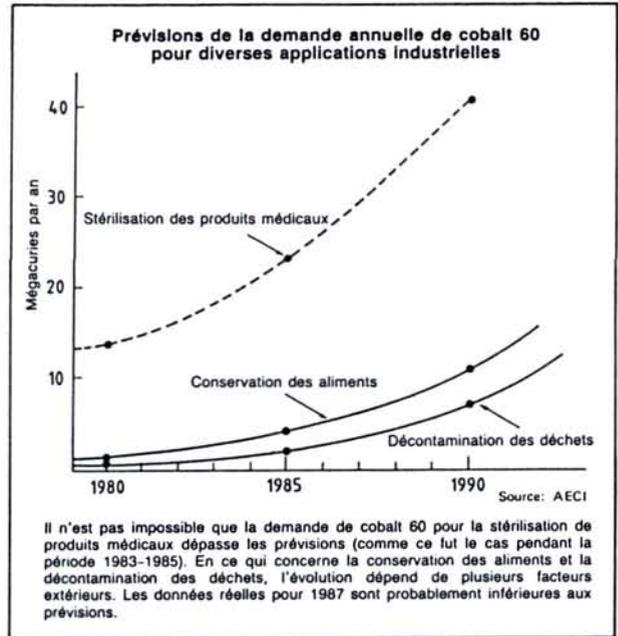
● **Accélérateurs à faisceau d'électrons de faible énergie.** Dans la gamme d'énergie de 0,15 à 0,5 MeV, la cellule de traitement est entièrement protégée, les écrans contre les rayonnements faisant partie intégrante de l'accélérateur. Ces dispositifs sont de faible encombrement et peuvent donc s'installer facilement dans toute zone de travail ou s'incorporer à une chaîne de production. La portée utile des électrons dans cette gamme d'énergie est très faible (moins de 1 mm) et les applications se limitent aux traitements des surfaces, tels la réticulation des pellicules fines de matières plastiques et des isolants minces, le traitement des couches de finition des papiers, bois, matières plastiques et métaux, etc., des revêtements siliconés sur papier et pellicules, des encres offset et des colles.

On applique ces techniques au lieu des procédés aux rayons ultraviolets pour traiter les revêtements pigmentés ou obtenir des rythmes très rapides de production. Dans maintes applications, tel le traitement simultané de la colle et du revêtement de finition (papier ou pellicule) des panneaux de bois, l'irradiation ne peut être remplacée par aucune autre méthode. Les accélérateurs de grande puissance, de l'ordre de 300 à 500 kW, peuvent donner des faisceaux d'électrons atteignant 0,3 MeV. Avec les accélérateurs industriels de cette catégorie, on atteint facilement des capacités de production de l'ordre de 1000 mètres à la minute, sous un débit de dose absorbée de 10 kilograys. Ces machines ont été mises à l'essai avec succès pour le traitement des effluents gazeux en vue de protéger l'environnement. (Voir, page 25, l'article sur ce sujet dans le présent numéro du Bulletin).

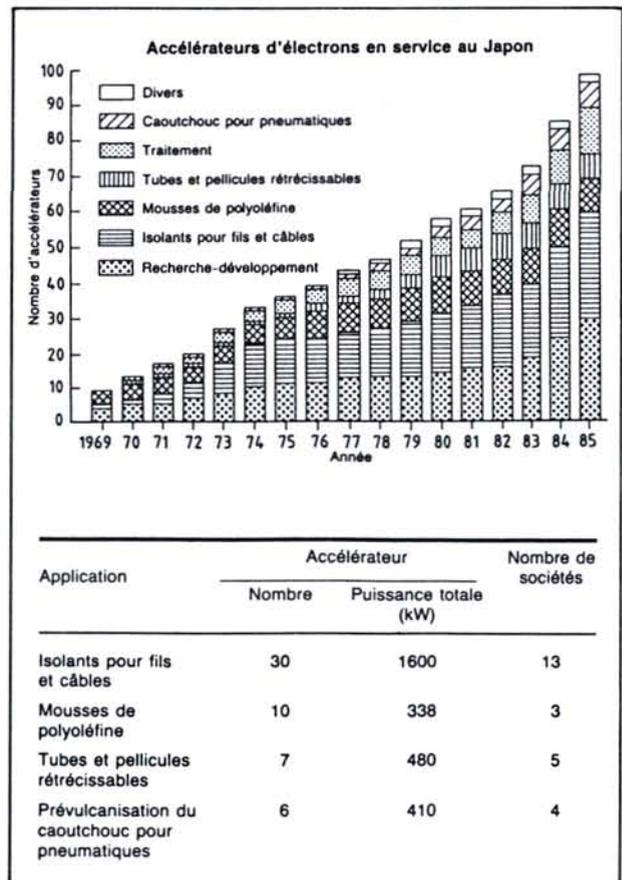
● **Accélérateurs à faisceau d'électrons dans la gamme d'énergie de 0,5 à 10 MeV.** On trouve sur le marché des machines de ce type d'une puissance atteignant 200 kW. Les zones radioactives sont entourées d'un écran de béton de 1,5 à 2 m d'épaisseur. Ces dispositifs ont été adoptés par la plupart des grandes industries — matières plastiques, véhicules à moteur, caoutchouc, pétrochimie, fils et câbles. Elles sont essentiellement utilisées pour la réticulation des matières plastiques (isolants de fils et câbles, feuilles thermorétractables, tuyaux en polyéthylène pour eau chaude, mousses, etc.), la radiovulcanisation des caoutchoucs et la transformation des polymères en vrac (dégradation contrôlée).

La plupart des accélérateurs utilisés pour ces applications se situent dans la gamme d'énergie de 0,5 à 4 MeV. Quelques-uns d'entre eux servent à l'irradiation des denrées alimentaires (désinfestation des céréales en URSS et décontamination des aliments pour animaux en Israël). Les essais de décontamination, à l'aide de ces accélérateurs, des boues provenant du traitement des eaux usées n'ont pas donné de très bons résultats jusqu'à présent, mais le créneau reste ouvert. Les machines de 600 à 800 kV semblent avoir un bel avenir dans la protection de l'environnement, car elles serviront à traiter les gaz de combustion.

Plusieurs accélérateurs linéaires d'électrons (LINAC) sont utilisés pour la stérilisation industrielle de produits médicaux (au Royaume-Uni, aux Etats-Unis, en France,



au Danemark et en Pologne). Toutefois, en raison principalement de leur coût élevé et de leur faible puissance, ces machines ne sont pas d'un usage aussi répandu que les machines de faible énergie à courant continu. Les applications des faisceaux d'électrons sont en progression constante, comme on peut le voir au Japon (voir les graphiques).



Les irradiateurs dans les pays en développement

Le transfert de la technologie de l'irradiation aux pays en développement se fait avec plus ou moins de succès selon la technique dont il s'agit, le pays, l'infrastructure existante et maints autres facteurs extérieurs. A l'échelle industrielle, c'est la radiostérilisation qui est de loin la technique la plus avancée. Une vingtaine de pays exploitent actuellement quelque 25 irradiateurs gamma au cobalt 60 pour la stérilisation industrielle de produits médicaux.

Les autres applications industrielles ne sont généralement pas très répandues et il y a très peu de grandes installations en exploitation.

L'Agence continue de contribuer par divers moyens à la promotion et au transfert des techniques d'irradiation. Les projets régionaux sont au nombre des moyens les plus efficaces. Rappelons à titre d'exemple le projet entrepris dans la région Asie et Pacifique par le Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD) et l'AIEA dans le cadre de l'Accord régional de coopération. Au cours de ces dernières années, quelque 140 personnes ont été formées dans les différentes

branches de la technologie de l'irradiation. Rien qu'en 1986, huit séminaires nationaux sur la gestion de la radiostérilisation et du radiotraitement ont été organisés. D'autres séminaires et des stages sont prévus pour la période 1987-1991. En conséquence, plusieurs projets industriels ont été définis et mis en œuvre dans la région.

Les radio-indicateurs dans l'industrie

Pour résoudre les problèmes que pose le transport des matières, l'ingénieur se trouve souvent devant la nécessité d'obtenir une mesure absolue du débit. Comme il est généralement impossible d'obtenir cette information directement, il ajoute au courant principal une quantité déterminée d'une substance qui sert d'indicateur et dont on peut mesurer le débit. Mais il faut d'abord qu'il détermine le rapport entre l'écoulement de cet indicateur et le courant de matières à mesurer.

L'information fournie par l'indicateur est transmise par un signal électrique émis par exemple par un dispositif détecteur, ou par la variation de densité d'une émulsion nucléaire, obtenue par autoradiographie (*le diagramme indique le genre d'information que fournissent les indicateurs*).

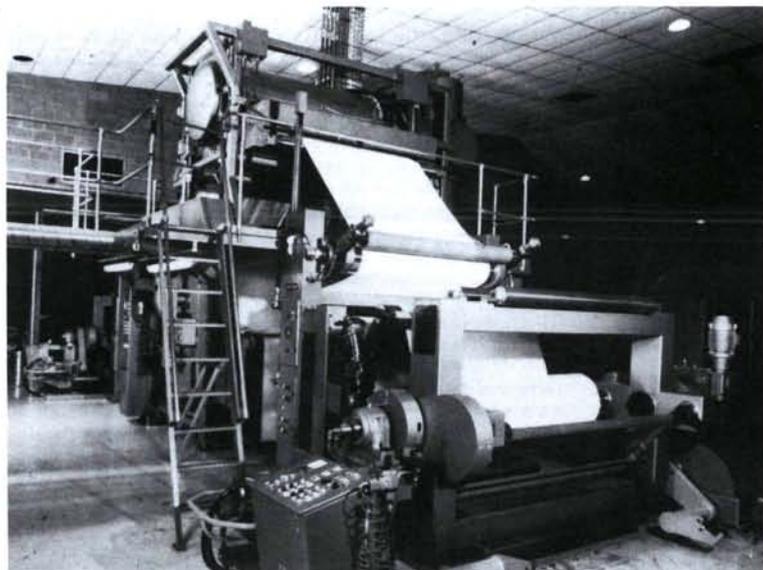
A titre d'exemple, considérons le cas d'une fuite dans un échangeur de chaleur, dispositif comportant deux circuits distincts dans lesquels circulent des liquides. La question qui se pose est simple: y-a-t-il une communication entre les deux circuits? La réponse est également simple: c'est oui ou non. Pour le savoir, il suffit d'injecter un indicateur dans le premier circuit; si on le détecte dans le deuxième circuit, la preuve est faite.

Il existe des techniques plus raffinées de marquage qui sont assistées par l'analyse de systèmes, méthode fondée sur l'exploitation de la réponse d'un système par un stimulus appliqué à l'entrée de ce système. Prenons le cas d'un mélangeur, dans une usine chimique, alimenté en eau à débit constant et supposons qu'une substance donnée de concentration variable est introduite dans le système. Une quantité déterminée d'un indicateur de cette substance est injectée à l'entrée et la concentration est mesurée à la sortie. La fonction obtenue donne la distribution des temps de transit de la substance et fournit le meilleur échantillon de transport de masse que l'on puisse obtenir. Elle peut servir à calculer les variations de concentration à la sortie, connaissant les variations de concentration à l'entrée.

La méthode des indicateurs est le meilleur moyen d'obtenir la distribution des temps de transit dans un système. On comprend aisément toute l'importance de cette fonction qui permet de faire intervenir les temps de séjour et la dispersion dans l'analyse de certains problèmes. On peut alors décider soit d'exploiter ces phénomènes, comme dans le cas du mélangeur, soit de les réduire au minimum s'il s'agit par exemple de transporter successivement plusieurs sortes d'hydrocarbures dans un oléoduc.

Les radio-indicateurs présentent divers avantages: premièrement, leur concentration est mesurable par des détecteurs situés à l'extérieur des canalisations ou des cuves. Deuxièmement, les mesures faites sur des spécimens prélevés dans le circuit sont simples et indépendantes de la matrice de l'échantillon. Troisièmement, le radio-indicateur est irremplaçable lorsqu'il s'agit de marquer des éléments ou des espèces chimiques déter-

Information fournie par les indicateurs				
«Tout ou rien»		Détermination d'une connexion entre deux ensembles		
Analogique				
Détermination d'un rapport quantitatif entre deux ensembles				
Questions	Signal	Facteur temps	Exemples	
connexion?		néant	● détection de fuites	
connexion? où?		néant	● autoradiographie	
connexion? où? combien?		néant	● autoradiographie + densitométrie	
combien?		néant	Méthode par dilution ● pesée du mercure des cellules électrolytiques	
combien? quand?		f(t)	● mesure des débits	
combien? quand?		f(t)	Analyse de système ● fonction de flux massique	
		h(t)	● distribution des temps de transit	
connexion? où? combien? quand?		f(t x y)	● relevé de la dispersion	



Processeur à faisceau d'électrons pour traitements divers. (Photo: Energy Sciences, Inc.)

minés. Par exemple, lorsqu'on étudie la corrosion à chaud des alliages d'acier par le soufre, on peut marquer celui-ci avec du soufre 32 et le détecter à la limite des grains par autoradiographie. Pour le même prix, l'information fournie par un radio-indicateur est généralement plus riche que celle que l'on obtient avec des indicateurs non radioactifs.

Les applications de ces techniques sont réglementées par les autorités nationales compétentes. Les très faibles concentrations et les courtes périodes des radio-indicateurs communément utilisés permettent généralement de travailler à des niveaux de radioactivité bien inférieurs aux valeurs maximales fixées par la réglementation.

Applications actuelles des radio-indicateurs dans l'industrie

Un manuel en préparation à l'AIEA montrera comment les radio-indicateurs servent la plupart des industries (voir l'encadré). Les vingt auteurs qui collaborent à cet ouvrage viennent des onze pays suivants: Etats-Unis d'Amérique, Finlande, France, Inde, Israël, Pays-Bas, Pologne, République démocratique allemande, République fédérale d'Allemagne, Royaume-Uni et Tchécoslovaquie. D'autres pays encore utilisent les radio-indicateurs dans des proportions non négligeables. Le manuel en question montre que pratiquement toutes les industries tirent profit des applications des radio-indicateurs — les deux-tiers de l'ouvrage traitent du génie chimique et le reste est essentiellement consacré à la métallurgie, à la prospection minière et au génie environnemental et sanitaire.

Les techniques de radiomarquage sont utilisées dans les laboratoires, notamment pour étudier la cinétique et la mécanique des réactions chimiques, et, dans les usines, pour détecter les causes d'avaries (fuites, obstructions de canalisations), pour déterminer les caractéristiques des circuits (débit, volume mort, partage, déviation), et aussi pour optimiser la surveillance des opérations. Dans les laboratoires, elles sont appliquées à la recherche, et des établissements étatisés ou privés y ont recours pour fournir des services à titre onéreux. Parmi ces établissements commerciaux, on relève les Physics and Radioisotope Services, ICI, au Royaume-Uni; le Commissariat français à l'énergie ato-

mique; une société privée indienne spécialisée dans les bilans de mercure; et enfin un établissement finlandais spécialisé dans la mesure des débits. Le succès de ces entreprises, soumises à la loi de l'offre et de la demande, est la meilleure preuve des avantages économiques que procurent les applications des radio-indicateurs.

Dans les pays en développement, la pénétration des techniques des radio-indicateurs dans l'industrie est très variable. Certains de ces pays, tels le Chili, l'Inde et la Pologne, en sont au même point que les pays les plus avancés dans ce domaine, tandis que d'autres, tout comme certains pays industrialisés, s'en tiennent encore à la règle des 15 à 20 ans de délai pour l'application d'une technologie nouvelle. Il y a aussi des retards dus à des raisons économiques ou au manque d'information. Quoiqu'il en soit, le progrès est acquis (voir le tableau pour les applications dans la région Asie et Pacifique).

Manuel sur les radio-indicateurs dans l'industrie

L'AIEA prépare actuellement un répertoire complet des indicateurs dans l'industrie, qui traite de la méthodologie de cette technique et présente des études de cas dans certaines industries. Les grands titres de l'ouvrage sont les suivants:

- La notion de radio-indicateur.
- Principes de la technologie des radio-indicateurs.
- Méthodologie des radio-indicateurs (indicateurs et analyse de système; modélisation de flux types; information fournie par les indicateurs dans la modélisation des grands systèmes; apport des indicateurs à la solution des problèmes complexes; opérations à débits et volumes variables).
- Applications générales (emploi des modèles de flux; valeur des paramètres; débits; bilans massiques; caractéristiques et emploi des indicateurs solides; rendement des mélangeurs; détection des avaries; diffusion, perméation; granulométrie; corrosion et phénomènes de surface; emploi des isotopes dans les études mécaniques et cinétiques; circuits à deux phases; surveillance des opérations; paramètres cinétiques).
- Etudes de cas (industrie chimique; industrie du papier et de la pâte à papier; industrie pétrolière; industrie du ciment; métallurgie; énergétique; électronique; mécanique; génie environnemental et sanitaire; industrie extractive).
- Orientations actuelles des études et des applications.

On peut obtenir des renseignements complémentaires sur cet ouvrage en s'adressant à la Section des applications industrielles et de la chimie, Agence internationale de l'énergie atomique.

Quelques applications industrielles des radio-isotopes dans la région Asie et Pacifique

Industrie	Application	Isotope	Pays	Observations
Pétrole	débits des puits d'injection d'eau	barium 131 (microsphères)	Chine	3095 puits mesurés jusqu'en été de 1985; 10 000 prévus jusqu'en 1990
Pétrole	recherche de fuite sur les 140 km de l'oléoduc de Viramgam-Koyali (pétrole brut)	brome 82	Inde	5 curies/kilomètre; après mise sous pression pendant 24 heures et purge, la fuite a été localisée à un mètre près
Pétrole	recherche de fuite		Sri Lanka	
Pétrole	fuites souterraines des puits	antimoine 124 (antimoine triphényle) iode 131-iodobenzène	Chine	5 recherches depuis 1968
Gaz naturel	distribution des agents anti-corrosion dans les gazoducs	eau tritiée	Chine	
Pétrochimie	recherche des obstructions dans les oléoducs	cobalt 60	Inde	Source de 3 mCi pour la recherche des obstructions dans l'oléoduc reliant les raffineries de Trombay au complexe NOCIL, New Bombay
Construction mécanique	mesures de l'usure dans les moteurs à combustion interne	activation neutronique (superficielle)	Inde	programme général portant sur l'usure des segments, des paliers, de systèmes d'injection du carburant, et des soupapes
Construction mécanique	mesures de la consommation d'huile		Inde	étude des effets de la charge nominale et de la vitesse, et de la puissance au frein
Construction mécanique	température maximale de travail et distribution des températures des pièces mobiles	krypton 85 (implantation)	Chine	
Production d'énergie d'origine géothermique	dynamique de la migration de l'eau réinjectée		Philippines	
Production d'électricité	mesure de rendement des turbines	brome 82, eau tritiée	Inde	mesure du débit par dilution de l'indicateur et autres moyens avec une marge d'erreur de $\pm 1\%$ dans une centrale hydroélectrique proche de Bombay
Production d'électricité	rendement du générateur de vapeur d'une centrale nucléaire	sodium 24	Rép. de Corée	
Sidérurgie	effet du garnissage de la poche de coulée sur la qualité de l'acier	calcium 45	Chine	effet de l'inclusion dans l'acier des produits de l'érosion du garnissage de la poche; économie de garnissage estimée à 1,3 million de yuans
Sidérurgie	effet du calcium sur l'engorgement de la busette de coulée de l'acier calmé à l'aluminium	calcium 45	Chine	économie estimée à 52 000 yuans par an
Sidérurgie	corrosion à chaud de certains alliages (alliage de fer à base nickel; alliage au niobium à base nickel)	soufre 35 (sulfate de soude)	Chine	
Sidérurgie	évaluation de l'usure du garnissage réfractaire des hauts fourneaux; recherche de l'origine des inclusions de matières réfractaires; détermination de l'entraînement des scories dans le métal fondu		Inde	des radio-indicateurs sont utilisés par 5 aciéries: Jamshedpur (TISCO); Rourkela; Durgapur; Bhilai; Bokaro (SAIL)
Aménagement des côtes	études des sables et sédiments côtiers pour l'aménagement de ports et de chenaux	iridium 192 (verre)	Indonésie	nombreuses applications
Aménagement des côtes	étude du mouvement des vases pour déterminer les stratégies de dragage et le plan des chenaux	scandium 46, or 198 (sable)	Inde	études faites notamment pour les ports de Chochin et de Marmugao
Aménagement des côtes	études du mouvement des bancs de sable	cobalt 60 (verre)	Rép. de Corée	études faites au port de Mukho et de Sam Cheong, et dans la Baie de Young Il
Industrie chimique	charge de mercure des cellules d'électrolyse	mercure 197	Inde	services offerts à titre onéreux
Industrie chimique	charge de mercure des cellules d'électrolyse	mercure 197	Chine	
Industrie chimique	détermination des paramètres des procédés et des caractéristiques d'exploitation d'une installation		Inde	par exemple: distribution des temps de séjour, dilution et débits, à l'établissement Century Rayon
Industrie chimique	caractéristiques de mélange d'un réacteur pour la préparation de l'urée	anhydride carbonique (carbone 14)	Rép. de Corée	usine d'engrais de Chung Ju
Génie hydraulique	repérage des zones d'infiltration dans le barrage de Pedu	or 198 (eau tritiée)	Malaisie	les principales zones d'infiltration et les cheminements ont été repérés
Génie hydraulique	localisation des principales zones d'infiltration dans le bassin de retenue de Kihung	sodium 24	Rép. de Corée	
Génie hydraulique	mesure du débit des égouts		Philippines	
Génie hydraulique	mesure de l'écoulement des cours d'eau et des canaux d'irrigation	technétium 99m	Malaisie	études faites sur les rivières Langat, Semenyih et Lui, pour le compte du Département de l'irrigation et du drainage, et sur les canaux pour le compte de la Kemulen Agriculture Development Authority (KADA), Kelantan
Electronique	fuites des semi-conducteurs	krypton 85	Chine	
Electronique	fuites des semi-conducteurs	krypton 85	Thaïlande	

Dans ce tableau sont énumérées diverses applications industrielles des radio-isotopes dans des pays en développement Membres de l'AIEA qui participent au Programme régional de coopération dans la région Asie et Pacifique (Accord régional de coopération). Le tableau n'est pas complet car deux des pays donateurs qui participent au programme, à savoir l'Australie et le Japon, n'y sont pas mentionnés. Sont également omises les applications utilisant des sources scellées, telles que la radiographie, les jauges nucléaires et le radiocarottage.