

On utilise aujourd'hui les rayonnements pour stériliser un nombreux matériel médical: instruments chirurgicaux, sondes, etc., ainsi que pour la fabrication de fils et câbles téléphoniques plus résistants. (Photos CEA)



Les outils modernes

Le rôle peu connu mais croissant des rayonnements dans les opérations industrielles

par Vitomir Markovic

Presqu'inconnus du grand public et passés inaperçus depuis des dizaines d'années, les rayonnements ionisants sont devenus des instruments précieux qui contribuent à l'efficacité des opérations industrielles et de la fabrication de produits utilisés dans le monde entier.

Depuis 15 ans, par exemple, le traitement par les rayonnements, c'est-à-dire l'emploi de rayons gamma ou d'électrons de haute énergie comme source d'énergie industrielle, a connu une croissance de 10 à 15% par an, qui se mesure par le nombre et la puissance installée totale des sources de rayonnement.

On emploie généralement aujourd'hui deux types de sources de rayonnement: les isotopes émetteurs gamma, comme le cobalt 60 et le caesium 137, et les électrons de haute énergie produits par des accélérateurs dans une gamme d'énergies atteignant 10 mégavolts. Aucun de ces rayonnements ne crée de radioactivité dans les matières traitées.

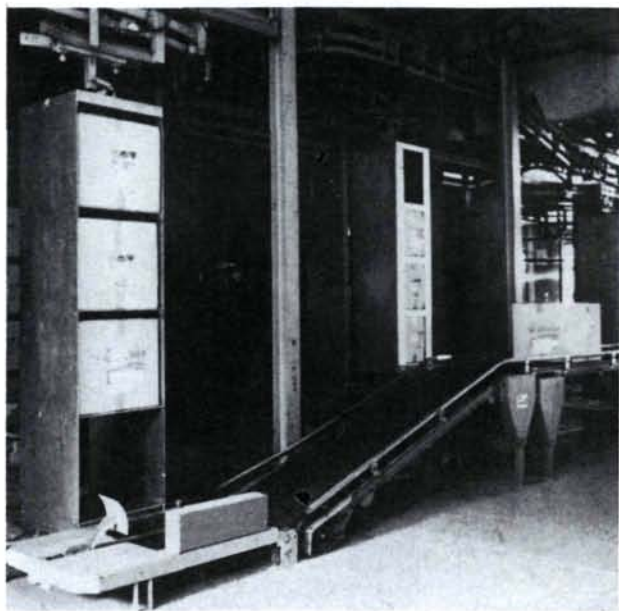
A l'heure actuelle, d'après les chiffres fournis par les industries, plus de 130 irradiateurs gamma industriels fonctionnent dans quelque 41 pays, et le nombre total de machines à faisceaux d'électrons est proche de 400 dans le monde entier. Ces instruments interviennent de

diverses façons dans la fabrication de produits tels que les pneus d'automobiles, les pièces d'ordinateur, les câbles téléphoniques, les plastiques et pellicules d'emballage ainsi que dans la désinfection et la stérilisation des articles médicaux à jeter après usage.

La valeur totale des produits irradiés est difficile à estimer, mais elle est probablement aujourd'hui plusieurs fois supérieure au milliard de dollars des Etats-Unis mentionné dans *Business Week* en 1977. Ce chiffre n'a rien de spectaculaire par rapport à d'autres productions industrielles, mais son importance atteste que le traitement par rayonnements est devenu un procédé industriel largement accepté et répandu.

La présente étude repose en grande partie sur les informations fournies lors de la série de réunions internationales sur le traitement par les rayonnements tenues tous les deux ans de 1976 à 1984, successivement à Puerto Rico, Miami, Tokyo, Dubrovnik et San Diego. Ces réunions ont été les principaux milieux d'échange d'informations scientifiques et techniques dans ce domaine. A San Diego, par exemple, se sont réunis environ 470 participants venus de 32 pays, et 120 communications ont été présentées au cours de 23 séances sur toutes les applications en usage ou à l'étude, y compris divers aspects du génie des rayonnements, de la sûreté, de la dosimétrie des rayonnements industriels, de la création de sources de rayonnements industrielles, de la réglementation et des questions juridiques.

M. Markovic fait partie de la Division de la recherche et des laboratoires du Département de la recherche et des isotopes à l'Agence.



Cet irradiateur gamma installé en Yougoslavie est un des 135 appareils de ce genre actuellement en service dans 41 pays.

Comment cela fonctionne-t-il?

Cette technique repose essentiellement sur l'emploi de l'énergie des rayonnements pour faire démarrer des réactions chimiques, provoquer des modifications biologiques ou modifier les propriétés chimiques et physiques des matériaux. Un emploi caractéristique d'une irradiation à faible dose absorbée permet, par exemple, avec un kilowatt de puissance de rayonnement, de ralentir la germination et, par conséquent, la perte de pommes de terre traitées à raison d'environ 10 tonnes par heure. A l'autre extrémité de la gamme, l'emploi d'une forte dose absorbée peut servir à stériliser des articles médicaux à raison d'environ 2000 seringues à l'heure, soit environ 15 à 20 millions par an.

Dans ces emplois et dans d'autres utilisations courantes, le traitement par rayonnements présente de nombreux avantages par rapport aux procédés industriels qui font appel aux produits chimiques et à la chaleur. Presque tous les emplois du radiotraitement permettent de réaliser d'importantes économies d'énergie par rapport aux techniques rivales. Ce procédé procure aussi d'autres avantages généraux: fiabilité et simplicité du contrôle du fonctionnement; réduction ou élimination totale des polluants industriels; qualité supérieure, voire exceptionnelle des produits.

Un autre point que l'on omet trop souvent de souligner est le niveau élevé de la sûreté des installations d'irradiation industrielles, qu'atteste l'excellente performance en matière de sûreté obtenue dans nombre de ces installations depuis quelques années.

Financièrement, le traitement par les rayonnements n'est pas une technique miracle: le coût peut être inférieur, comparable ou supérieur à celui des autres procédés. L'accusation traditionnelle de cherté autrefois portée contre les rayonnements a cependant été maintes fois démentie. Les rayonnements ne sont pas bon marché, mais le nombre des emplois dans lesquels ils ont réussi montre sans conteste qu'ils ont atteint depuis

longtemps le stade de la commercialisation grâce à leurs avantages techniques et économiques.

Certes, le succès n'a pas été le même dans tous les emplois. Les réussites sont largement compensées par autant d'essais manqués, de désillusions, voire d'échecs complets. On a par exemple essayé de traiter les textiles par rayonnement, mais sans obtenir les résultats espérés. La polymérisation radioinduite n'a pas non plus réussi à s'imposer, malgré les avantages qu'elle présente sur les procédés catalytiques traditionnels à haute température et sous haute pression. De même la synthèse chimique par les rayonnements a ouvert des perspectives mais n'a guère intéressé l'industrie.

Pour plus de clarté, il importe de faire la distinction entre:

- *les techniques établies*, employées dans les opérations industrielles depuis de nombreuses années dans le monde entier;
- *les techniques montantes*; ce sont celles qui ont plus ou moins passé le stade de la recherche et développement, sont parvenues au niveau de l'application pilote ou semi-industrielle, mais ne sont pas encore pleinement commercialisées;

Les projets en cours d'exécution

L'AIEA n'a jamais cessé d'appuyer par divers moyens des projets de traitement par les rayonnements dans le monde entier.

En Hongrie, en Inde, en République de Corée et en Yougoslavie, l'Agence a exécuté, conjointement avec le Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD), des projets qui ont abouti à la création d'installations de radiostérilisation et à la production de maints articles à usage médical. Un projet similaire est en cours d'exécution en Iran.

Des projets comportant l'emploi d'accélérateurs d'électrons pour la réticulation et les traitements de surface ont aussi été exécutés en République de Corée et en Yougoslavie, où l'on produit entre autres des fils et des câbles par ces procédés.

En Asie et dans le Pacifique, treize pays participent à un grand projet PNUD/AIEA dans ce domaine, où les techniques d'irradiation occupent une place importante. En Indonésie, on a mis en service des installations pilotes d'irradiation pour la vulcanisation du latex naturel et pour le traitement des surfaces. Des centres de formation et de démonstration ont été créés en République de Corée, ainsi qu'en Inde, pour la radiostérilisation. Un autre centre, consacré aux opérations de réticulation sous rayonnements, sera bientôt créé en Chine.

Dans plusieurs autres pays, les projets d'assistance technique de l'Agence visent à installer des sources de rayonnements et à exécuter des programmes de recherche et d'essai concernant les techniques d'irradiation. Au nombre des pays intéressés figurent le Bangladesh, la Bulgarie, l'Equateur, la Malaisie, le Pérou, les Philippines, le Portugal, Sri Lanka, le Vietnam et la Zambie.

Des programmes de recherche coordonnée visent notamment l'emploi de la technologie des rayonnements pour l'immobilisation des matières bioactives ainsi que la modification par les rayonnements des propriétés des polymères en vue d'applications dans l'industrie et en médecine.

Comme dans toutes les initiatives de l'Agence, ces activités sont complétées par des cours de formation, des voyages d'études, des bourses, et des réunions internationales destinées à favoriser et à améliorer la circulation de l'information technique.

• *les techniques à l'étude*, qui en sont au stade de la recherche et paraissent pouvoir se prêter à la commercialisation dans l'avenir.

Les techniques établies

Probablement 90% ou plus du total de la puissance d'irradiation installée servent à un petit nombre de procédés industriels. Il s'agit principalement de la stérilisation, de la réticulation, du traitement des surfaces et de la greffe par irradiation.

La radiostérilisation des articles médicaux

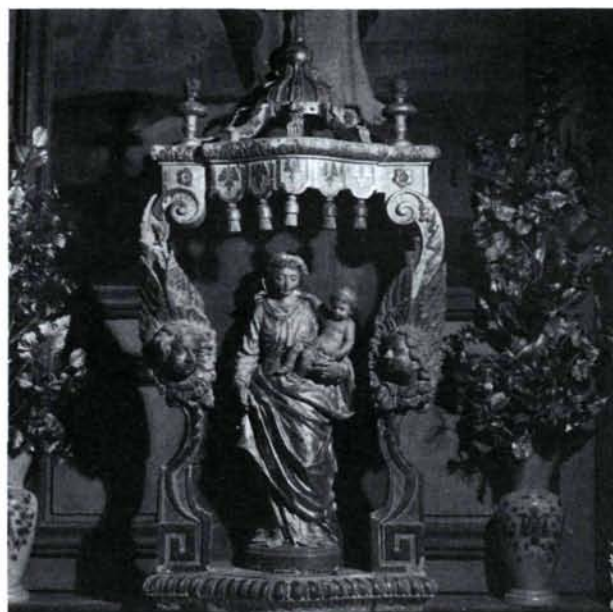
C'est la première application des rayonnements qui ait atteint un niveau industriel dans les années 1950 et 1960, surtout en Australie, aux Etats-Unis, en France et au Royaume-Uni. Elle n'a cessé de se développer librement depuis lors. A l'époque où les rayonnements recevaient un accueil enthousiaste dans les milieux universitaires et industriels, une autre technique de stérilisation industrielle à froid des articles médicaux était largement en usage, celle de l'oxyde d'éthylène. Les arguments en faveur de l'irradiation portaient surtout sur la fiabilité et la qualité supérieure du résultat. Plus tard sont venus s'y ajouter les avantages de prix résultant des progrès de la technique, de la multiplication des sources de rayonnement de grande puissance, et de l'augmentation du volume des articles traités.

A l'heure actuelle, d'autres facteurs interviennent à leur tour. L'emploi de l'oxyde d'éthylène est en défaveur, non seulement à cause de son prix, mais aussi parce que l'exposition au produit chimique est plus difficile et plus chère à maîtriser que l'exposition aux rayonnements ionisants. On sait en effet que ce produit est dangereux, toxique et carcinogène, et qu'il exerce des effets de mutagenèse sur les organismes vivants. On se préoccupe de plus en plus de la pollution qu'il inflige à l'environnement et de l'exposition du personnel et des malades qui emploient les articles médicaux, car on retrouve sur ces derniers des traces du gaz.

Par contre la sûreté professionnelle du personnel des installations d'irradiation est complètement et facilement assurée, et les produits irradiés sont exempts de traces de radioactivité. En cas de besoin les articles radiostérilisés peuvent être mis à la disposition des utilisateurs immédiatement après la stérilisation.

Il y a aujourd'hui de 120 à 130 installations industrielles, dont la plupart emploient le cobalt 60, qui pratiquent la radiostérilisation dans une quarantaine de pays. La production totale est de l'ordre de trois millions de mètres cubes par an.

On s'attend que cette utilisation se développe encore plus vite dans un proche avenir en raison des restrictions imposées par les gouvernements à l'emploi de l'oxyde d'éthylène. Par exemple, à l'heure actuelle, 40% environ de la production totale d'articles médicaux à jeter après usage aux Etats-Unis sont radiostérilisés et l'on pense que cette proportion doublera d'ici à 1990. D'autres pays connaîtront probablement la même évolution. Un des avantages principaux qu'offrent les rayonnements par rapport aux autres procédés est que les articles peuvent être stérilisés *après* emballage, ce qui évite les risques de recontamination.



L'irradiation sert aussi à préserver les statues, sculptures et autres objets d'art en bois. (Photo CEA)

De nombreux pays en développement ont adopté cette technique avec de bons résultats. Ses avantages vont beaucoup plus loin que ceux qu'elle procure directement: augmentation de la valeur de la production, économies de personnel, etc. Elle a puissamment contribué à améliorer le niveau des soins de santé en assurant la production sur place et un plus large emploi d'articles médicaux qui ne servent qu'une fois tels que les seringues, sondes, appareils de transfusion sanguine par exemple. Le transfert de cette technologie est relativement simple et exempt des nombreuses difficultés qui se présentent dans d'autres cas.

La réticulation: fils, pneus, plastiques, mousses

La réticulation par irradiation consiste essentiellement à modifier les propriétés des polymères en créant des liens chimiques entre macromolécules isolées. Le rayonnement, qui est particulièrement apte à faire démarrer ce processus chimique, transforme le polymère en une structure moléculaire qui présente deux caractéristiques importantes: elle ne coule pas aux températures élevées et, au-dessus du point de fusion, elle manifeste des propriétés analogues à celles du caoutchouc.

Le premier de ces effets présente une grande importance dans les emplois ayant trait à l'isolation des fils et cables; le second facilite la production de matériaux thermo-rétractables et de mousse de polymère. La réticulation par les rayonnements des isolants pour fils et cables confère au produit la qualité qui permet de l'employer à des températures plus élevées, dues par exemple à des surcharges, qui risqueraient autrement de détériorer irréparablement l'isolant.

Cette propriété est essentielle pour les fils des circuits internes du matériel de télévision et audio, des ordinateurs, des systèmes de signalisation, des appareils électriques, pour les lignes de transport de force ainsi que dans la construction automobile, aéronautique et maritime. En

comparaison avec la réticulation chimique, l'irradiation est plus économique, consomme moins d'énergie, occupe moins de place et se prête à un contrôle plus fiable. Les fils de petit diamètre, par exemple, ne peuvent être bien réticulés que par les rayonnements.

Par contre, cette méthode ne convient pas pour les câbles à haute tension, au-dessus de 30 kilovolts environ, parce que la pénétration des électrons, seuls utilisés pour cet emploi, est limitée. Aussi les techniques chimiques et l'irradiation sont-elles dans une large mesure complémentaires, et la plupart des grandes tréfileries et câbleries des pays industrialisés disposent-elles d'un ou plusieurs postes de réticulation chimique ou par les rayonnements pour couvrir leur large gamme de produits.

Plus de 100 accélérateurs d'électrons d'une puissance moyenne de 40 à 50 kilowatts sont utilisés dans le monde entier à cette fin.

La radioréticulation des polymères sert aussi à fabriquer des produits thermo-rétrécissables tels que tubes, pellicules et rubans. Les produits sont irradiés et réticulés jusqu'à un niveau prédéterminé. Après irradiation, on les chauffe au-delà du point de fusion, on les étire dans une ou deux dimensions de deux à quatre fois, puis on les refroidit pour assurer le maintien de cette forme étirée. Lors de l'utilisation on chauffe de nouveau le produit au-delà du point de fusion du polymère et il reprend la forme qu'il avait avant l'étirage.

Les emplois sont nombreux: emballage de produits alimentaires et autres, isolations de pièces et de connexions électriques, connecteurs pour câbles de télécommunications, isolation d'oléoducs. La technique est extrêmement compliquée et les transferts sont rendus très difficiles par l'existence de brevets, de secrets de fabrication et d'autres facteurs.

Plusieurs grands fabricants de pneumatiques en caoutchouc, notamment aux Etats-Unis, en France et au Japon, emploient les rayonnements pour réticuler le caoutchouc non vulcanisé afin d'en améliorer les propriétés mécaniques à un certain stade du processus de fabrication.

La radioréticulation des polymères trouve aussi d'autres emplois industriels à relativement grande échelle. L'un d'eux intervient dans la fabrication de la mousse de polyéthylène pour emballages, ainsi que des tubes à eau chaude en polyéthylène. Bien qu'il existe déjà dans le commerce des formules de polymères «prêts à porter» pour l'isolation et la radioréticulation, le problème de l'approvisionnement se pose si l'on veut transférer cette technologie aux pays en développement dépourvus, par ailleurs, de moyens de recherche et développement.

Traitements des surfaces par irradiation: bandes vidéo, papier, panneaux en bois

Il s'agit d'une large gamme d'emplois comportant le traitement de revêtements, d'encre et d'adhésifs sur des substrats très divers tels que le papier, le bois, le métal et les matières plastiques; le revêtement ou le placage de papier, de pellicules et de feuilles minces; le traitement de revêtements magnétiques pour bandes audio et vidéo, et celui d'appareils sensibles à la pression.

Au nombre des avantages de cette technique figurent la rapidité d'application et l'obtention d'un apprêt très uniforme; l'emploi de revêtements sans solvants qui abaisse les coûts et élimine la pollution; l'absence d'accumulation de chaleur pendant l'opération, qui permet d'appliquer ce procédé à des substrats sensibles à la température; enfin la réduction de la consommation d'énergie et de l'encombrement.

Cette technique est caractérisée par l'emploi d'électrons de faible énergie, d'ordinaire entre 0,15 et 0,3 mégavolts. La principale originalité de ces machines est qu'elles peuvent être dotées de leur propre protection et installées dans n'importe quel environnement sans qu'on ait besoin des constructions en béton coûteuses et encombrantes indispensables à l'utilisation sans danger des faisceaux d'électrons de plus haute énergie ou du rayonnement gamma des isotopes.

On applique d'ordinaire un revêtement constitué par un mélange spécial (le plus souvent à base d'uréthane, d'époxy ou d'oligomère acrylé) sur la surface du matériau que l'on traite ensuite en l'exposant à un rideau d'électrons de haute énergie. La polymérisation est déclenchée par la formation de radicaux libres très réactifs et elle s'achève beaucoup plus rapidement que l'opération par voie thermique, qui prend du temps et consomme beaucoup d'énergie. Grâce aux accélérateurs modernes et au nouveau matériel de manutention, la vitesse de l'opération est de l'ordre de plusieurs centaines de mètres par minute sur des largeurs atteignant environ deux mètres.

Le radiotraitement est une technique qui s'est très rapidement répandue depuis quelques années, notamment dans le domaine des produits magnétiques. Un fabricant des Etats-Unis, par exemple, a signalé l'installation dans le monde de plus de 70 nouveaux accélérateurs auto-protégés de basse énergie entre 1980 et 1983.

Il existe dans le commerce de nombreuses formules d'emploi du radiotraitement, dont la teneur exacte fait ordinairement l'objet d'une exclusivité. Cette circonstance, et la très grande précision qu'exige la conduite du procédé (vitesse, faisceau d'électrons, environnement) et la détermination de ses paramètres, constituent les principaux obstacles au transfert de cette technologie. En revanche, les investissements dans les accélérateurs, le matériel de manutention et les locaux sont peu élevés et rapidement récupérables.

Greffes et autres procédés: membranes, poêles à frire, produits du bois

Ce procédé sert à modifier les propriétés de surface de matériaux qui sont le plus souvent des polymères. Le rayonnement provoque la formation à la surface du polymère de radicaux libres actifs. En les mettant en contact avec des monomères réactifs, soit après, soit pendant l'irradiation, on peut lier à la surface, par voie chimique, un groupe d'une fonction chimique différente.

Le champ d'application industrielle de ce procédé est sensiblement moins large que celui des autres emplois des rayonnements, mais on l'a employé avec succès dans de nombreux pays pour la production de matières bio-compatibles, de membranes à échange d'ions à divers usages, et de membranes minces à perméabilité sélective pour cloisons d'accumulateurs.



Pneus d'automobile, composants électroniques, articles ménagers et papier sont au nombre des produits dont la fabrication comporte un traitement par les rayonnements. (Photos UKAEA)

On emploie depuis bien des années à une grande échelle la décomposition par les rayonnements du téflon (polytétrafluoroéthylène). Dans cette opération, le rayonnement interrompt la longue chaîne moléculaire du polymère, abaisse le poids moléculaire et le transforme enfin en poudre fine. Ce procédé a trouvé de nombreux emplois dans la production de lubrifiants spéciaux résistant à la chaleur, de revêtements de poêles à frire, etc. Le matériau de départ est le plus souvent constitué par des déchets de téflon.

On obtient des compositions bois-plastiques en polymérisant par les rayonnements des monomères qui imprègnent le bois, ce qui donne des produits de qualité supérieure, même en partant de bois de basse qualité. On emploie cette technique assez rarement mais avec succès aux Etats-Unis pour la fabrication de parquets, de meubles et de divers ustensiles. En France et en Tchécoslovaquie on emploie avec un grand succès un procédé essentiellement analogue, avant tout pour la conservation des objets d'arts en bois.

Les techniques montantes

Depuis quelques années on voit apparaître plusieurs autres procédés de traitement par les rayonnements qui peuvent aspirer à une plus large commercialisation, notamment:

- *L'irradiation des produits alimentaires.* Actuellement employé dans plus d'une douzaine de pays, le traitement des produits alimentaires par irradiation a fait ses preuves pour la conservation des aliments et l'amélioration du ravitaillement, notamment dans les régions où la décomposition est grave et rapide. L'aptitude des aliments ainsi traités à la consommation par l'homme n'est plus contestée depuis longtemps. Mais au bout de 40 ans, le progrès commercial s'est ralenti. Si l'on considère la quantité totale d'aliments irradiés (35 000 tonnes environ en 1983) l'industrialisation reste limitée pour diverses raisons. Il semble que la tendance doive changer prochainement, notamment en ce qui concerne la réglementation. A l'heure actuelle, les pouvoirs publics autorisent l'irradiation de 80 produits

environ. Le procédé qui paraît avoir le plus de chances d'être accepté par l'industrie alimentaire est la radio-stérilisation des épices; il commence à être appliqué aux Etats-Unis. D'une façon générale, l'attitude de l'industrie en ce qui concerne l'élargissement des perspectives commerciales, tout au moins telle qu'elle s'est exprimée à la réunion sur le radiotraitement tenue à San Diego en octobre 1984, peut être qualifiée d'«optimisme prudent». Ceci est dû en partie aux désillusions éprouvées dans le passé.

● *L'irradiation des aliments du bétail.* Cette technique est très avancée en Israël par exemple, et on la considère comme la rivale la plus sérieuse de l'acide propionique dans plusieurs autres pays. Il s'agit généralement de deux opérations différentes: la radappertisation (fortes doses absorbées) des aliments pour animaux de laboratoire, et la radication (faibles doses absorbées) des aliments des animaux de la ferme. La première, qui ne porte d'ordinaire que sur de petites quantités, est déjà pratiquée à l'échelle semi-industrielle. La seconde s'applique à des capacités de dizaines de tonnes à l'heure et a pour principal objet de décontaminer les aliments contenant des salmonelles et autres micro-organismes pathogènes.

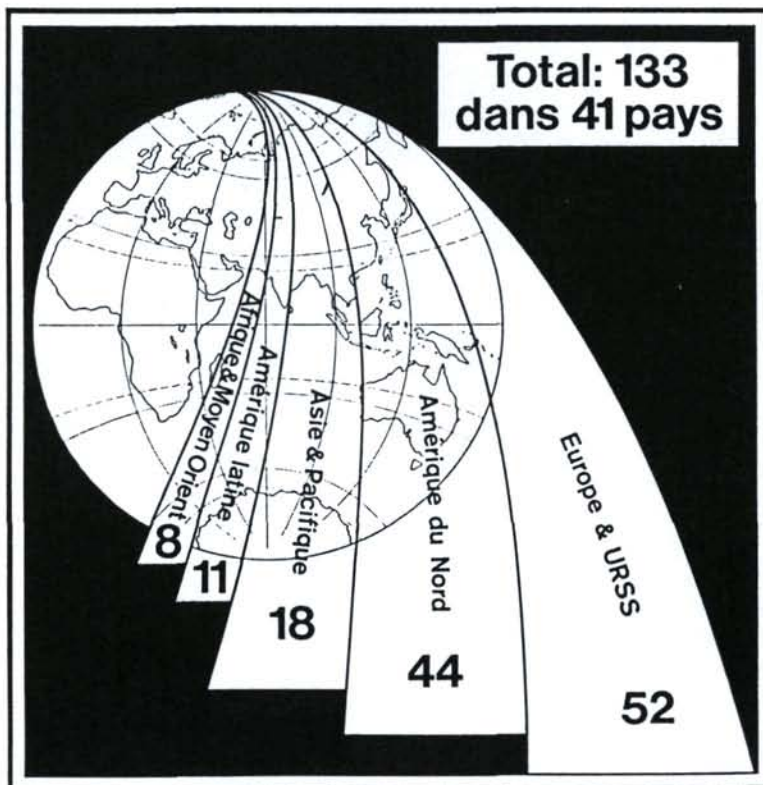
Les réglementations nationales se préoccupent de plus en plus des problèmes que pose cette contamination et exigent des normes de qualité microbiologique plus strictes.

● *Irradiation des gadoues.* La démonstration en a été faite avec succès dans plusieurs installations pilotes aux Etats-Unis et en République fédérale d'Allemagne. Une fois décontaminées, les gadoues peuvent servir d'engrais ou d'aliments d'appoint pour les ruminants. On a construit plusieurs installations d'essai différentes qui utilisent le cobalt 60, le caesium 137 et des accélérateurs d'électrons; quelques installations d'importance moyenne sont en construction ou en projet en Italie et en Inde. Comme la plupart des recherches dans ce domaine ont été publiées, l'introduction de cette technique dans les pays en développement pourrait être relativement simple et directe.

● *Irradiation des fumées.* Cette technique vise à éliminer en même temps les oxydes de soufre et d'azote des gaz de combustion des usines brûlant des charbons à forte teneur en soufre. Un procédé imaginé au Japon par Ebara et essayé dans une installation pilote construite en 1977 fait intervenir des faisceaux d'électrons en

Irradiateurs gamma en service dans le monde

Allemagne (Rép. féd. d')	5
Arabie Saoudite	2
Argentine	3
Australie	3
Afrique du Sud	3
Belgique	1
Brésil	3
Canada	4
Chili	1
Danemark	3
Ecosse	2
Egypte	1
El Salvador	1
Espagne	1
Etats-Unis	40
Finlande	1
France	3
Grèce	1
Hongrie	1
Inde	2
Indonésie	1
Iran	1
Irlande	2
Israël	1
Italie	5
Japon	7
Malaisie	1
Mexique	2
Nouvelle Zélande	1
Pays-Bas	2



République démocratique allemande	1	Suisse	1
République de Corée	1	Thaïlande	1
Royaume-Uni	8	Tchécoslovaquie	1
Singapour	1	URSS	11
Suède	2	Venezuela	1
		Yougoslavie	1

Dessin: W. Kalabis

Source: AECL

Sources de rayonnement: nouvelles orientations

Les controverses d'autrefois sur les avantages et inconvénients relatifs des sources gamma et des accélérateurs à faisceaux d'électrons ont été en grande partie résolues dans la pratique.

Aujourd'hui, on préfère le plus souvent les sources gamma pour la radiostérilisation, l'irradiation des aliments et, d'une façon générale, pour le traitement de produits volumineux et massifs. D'autre part on se sert exclusivement de machines à faisceaux d'électrons pour le traitement des surfaces et la réticulation. On les préférera probablement pour les opérations qui exigent de grandes puissances et une pénétration relativement faible, comme l'irradiation des aliments du bétail et la désinfection des céréales.

Les deux procédés peuvent se chevaucher dans certains domaines et le choix définitif peut dépendre d'une analyse technico-économique détaillée ainsi que d'autres facteurs accessoires.

L'évolution actuelle des machines à faisceaux d'électrons annonce certains progrès. C'est ainsi, par exemple, qu'on met au point des systèmes de canons à électrons sans filaments pour accélérateurs de faisceaux d'électrons de faible énergie, ainsi que des machines de traitement ultra-rapide ayant une plus grande longueur de zone d'irradiation et dotées d'un tambour refroidisseur pour les applications en surface à basse énergie. Les accélérateurs linéaires d'électrons (LINACS), autrefois peu en faveur dans l'industrie, ont fait des progrès; on peut maintenant construire des machines de grande puissance également utilisables comme générateurs de rayons X avec un rendement de conversion suffisamment élevé.

De grands progrès sont à noter aussi dans le domaine des irradiateurs gamma. Il s'agit entre autres de la mise au point d'irradiateurs au cobalt 60 de haute activité et d'irradiateurs au cobalt 60 à usages multiples. Ces appareils sont commandés par ordinateur et se prêtent au fractionnement et à l'augmentation progressive des doses.

Les technologies du rayonnement à l'étude

La recherche appliquée dans le domaine des rayonnements se déroule sur une si vaste échelle qu'en essayant d'énumérer tous les emplois possibles actuellement à l'étude on risquerait d'omettre des réalisations importantes. Ceci dit, voici les applications qui suscitent le plus grand intérêt.

- *Conversion de biomasse.* Les recherches actuellement en cours dans de nombreux pays visent à utiliser les rayonnements — soit seuls soit en combinaison avec d'autres procédés — pour décomposer en sucre et en alcool des matières ligno-cellulosiques (ce sont le plus souvent des déchets agricoles). Un autre procédé, étudié notamment au Brésil, consiste à irradier des copeaux de bois pour améliorer le rendement de la mouture dans la production de poudre de bois fine. On a pu réduire sensiblement la consommation d'énergie et obtenir une poudre de bois plus fine qui s'est avérée un excellent combustible pulvérisé. On peut aussi employer cette poudre comme matière première pour l'alimentation continue d'opérations d'hydrolyse.

- *Immobilisation de matières bio-actives.* Diverses techniques peuvent servir à capturer physiquement ou chimiquement des matières biologiquement actives dans des gels, ou pour les lier à un milieu immobilisé afin de produire des enzymes, des anticorps, des cellules et des médicaments, par exemple. L'immobilisation permet de prolonger l'activité enzymatique, ou encore de ralentir ou de programmer la production de médicaments afin d'en tirer le meilleur parti sur le plan industriel ou médical.

- *Vulcanisation du caoutchouc.* On a constaté que la radiovulcanisation du latex naturel est plus simple et consomme moins d'énergie que la vulcanisation au soufre, tout en conférant des propriétés physiques et mécaniques du même ordre. Des installations pilotes sont en cours de création en Indonésie et l'on espère commencer à commercialiser le procédé prochainement.

- *Polymères biocompatibles.* On a recours à des techniques de greffe par les rayonnements pour faire la synthèse de polymères biologiquement compatibles à partir de divers groupes hydrophiles et fonctionnels. La compatibilité avec le sang, par exemple, fait l'objet de recherches actives. Au nombre des produits qu'on peut obtenir au moyen de cette technique il faut citer les appareils destinés à être implantés dans le corps humain, ainsi que ceux qui doivent rester en contact prolongé avec les tissus ou servir à un usage externe. Quelques-unes de ces applications commencent à être commercialisées.

présence d'ammoniac. Les oxydes polluants sont éliminés et l'on obtient comme sous-produit des sels d'ammonium qui servent d'engrais. Une installation de démonstration est actuellement en cours d'achèvement aux Etats-Unis et doit entrer en service en 1985; les essais dureront un an. Un des obstacles qui risquent d'entraver le progrès de cette technique est qu'elle nécessite des machines à faisceaux d'électrons de grande puissance dans des gammes d'énergie moyennes (environ un mégavolt) mais avec une très forte puissance de faisceau (de 500 à 1000 kilowatts). Ceci dépasse de loin les possibilités actuelles des machines à canon d'électrons unique, et la technique devra être perfectionnée.

