

# L'AVENIR DES SOURCES DE RAYONNEMENTS INTENSES

par Henry Seligman \*

Le sujet que je me propose de traiter est extrêmement vaste et embrasse plusieurs disciplines scientifiques - personne ne saurait le connaître vraiment à fond. Je vais essayer d'expliquer pourquoi les sources de rayonnements intenses sont passées au premier plan de l'actualité, de dire comment on les fabrique, de montrer quels sont leurs rapports avec l'énergie atomique en général, d'évaluer la quantité d'énergie qu'on peut en tirer, enfin - et c'est le plus important - d'en décrire les utilisations dans différents domaines. Pour conclure, je dirai ce que je pense personnellement de leur avenir et des bienfaits qu'elles peuvent nous apporter.

Voyons d'abord ce qu'est l'énergie de rayonnement. On chiffre par plusieurs milliers le nombre de mégawatts d'énergie d'origine nucléaire en cours d'installation et on dit souvent que, pour chaque millier de mégawatts électriques installés, on obtient chaque année environ 3,3 mégacuries de césium-137 et autant de strontium-90. Ce sont là des quantités élevées, car il y a, comme je l'ai dit, des milliers de mégawatts installés : plusieurs millions de curies de césium et de strontium existent donc un peu partout dans les piscines de désactivation ou autres lieux où ils sont stockés. Voici donc la première raison d'utiliser ces grandes sources de rayonnements : tout simplement l'existence de cette quantité de matières radioactives obtenue comme sous-produit. En même temps, l'industrie électrique a connu un développement parallèle. Pendant et après la guerre, en effet, elle a accompli de grands progrès dans la mise au point d'appareils comme les accélérateurs linéaires et les machines Van de Graaff, que l'on peut facilement utiliser pour procéder à des irradiations massives.

Passons rapidement en revue les sources actuellement disponibles aux fins d'irradiation. Manifestement, la moins onéreuse est l'«élément combustible irradié» que l'on retire d'un réacteur. Ce fut même la première source utilisée par les centres d'études nucléaires qui avaient besoin de grandes sources de rayonnements pour leurs recherches. Pour avoir une idée de l'intensité des rayonnements émis par une telle source, considérons des réacteurs de recherche comme DIDO ou PLUTO. Chacun de leurs éléments peut donner environ 100 000 curies au moment où on le sort du réacteur. En groupant, disons, six éléments autour d'une enceinte de 90 cm de diamètre, on peut obtenir une dose d'environ 6 millions de rads par heure\*\* . C'est déjà là une dose massive fournie à un débit acceptable. Evidemment cette source présente des inconvénients. Elle est située au centre d'études nucléaires et l'utilisateur ne peut pas toujours y transporter l'échantillon

\* Directeur général adjoint de l'AIEA chargé de la recherche et des isotopes.  
Texte d'une conférence donnée à Vienne au mois de novembre 1964.

\*\* Le rad est l'unité fondamentale de dose absorbée.

à irradier. De plus, ces assemblages de barreaux combustibles n'ont pas un débit de dose uniforme: il est plus fort au centre que sur la périphérie. On peut y remédier en permutant les éléments combustibles de manière à obtenir une distribution uniforme. En résumé, c'est une source bon marché, toujours disponible, mais d'une utilisation assez délicate.

Avec ce genre de source, il faut prendre certaines précautions, car le lanthane-140 émet des rayons gamma dont 6% ont une énergie qui dépasse le seuil d'interaction avec le deutérium de l'eau; d'où un risque de radio-activité induite.

Une deuxième source est constituée par les gaz de fission. Le xénon-133 est un produit de la fission indésirable dans un réacteur, car c'est un «poison» efficace dont le pouvoir d'absorption des neutrons est élevé. Dans la première conception du réacteur Dragon, on avait envisagé de pomper les produits de fission pendant le fonctionnement du réacteur; en retirant les gaz de fission et en les faisant absorber, par exemple, par du charbon de bois, on espérait obtenir des sources de rayonnements très intenses et bon marché. C'était techniquement possible, mais on a finalement adopté une autre conception.

## IRRADIATION A BON MARCHÉ

Une autre possibilité consiste à utiliser des boucles dans les réacteurs. Certains réacteurs sont refroidis par un mélange de sodium et de potassium qui est un puissant absorbeur de neutrons et devient extrêmement radioactif. On peut utiliser ce mélange en dehors du réacteur comme source de rayonnements. On a essayé un procédé analogue aux États-Unis en utilisant des sels d'indium. Ces sels - dont le métal est également un puissant absorbeur de neutrons - circulent dans un réacteur et on utilise ensuite les rayons gamma qu'ils émettent. J'ai justement sous la main des chiffres concernant le réacteur de Hallam où l'on utilise du sodium comme refroidisseur. Les dispositions prises permettent d'obtenir un débit d'exposition de  $2 \cdot 10^5$  roentgens à l'heure. Dans ces conditions, l'irradiation est très bon marché: elle ne coûte que 1,2 cent par livre et par mégarad. On voit à quel point ces sources sont économiques, à condition de pouvoir apporter la matière à irradier au centre nucléaire.

Mais comme je l'ai dit, les sources les plus importantes qui existent un peu partout et ne servent à rien sont certains produits de fission à longue période comme le césium-137 et le strontium-90, et quelques autres. On a construit des installations dans plusieurs pays pour les extraire; malheureusement, cela revient assez cher et pour que ces installations deviennent rentables, il faut qu'elles soient très grandes. En d'autres termes, si l'on pouvait séparer à la fois 1 million de curies de strontium et de césium environ - les deux rendements de fission correspondants sont sensiblement égaux - on pourrait obtenir de la radioactivité à bon marché, comme le montre un calcul très simple. Le coût d'une usine de traitement chimique qui peut fonctionner pendant dix ans est de l'ordre de 1, 2 ou 3 millions de dollars. Si elle produisait chaque année 100 millions de curies

de césium et de strontium, la production d'un curie ne coûterait qu'une faible fraction de dollar, peut-être même moins de 1 cent. Toutefois, le prix de revient ne dépend pas uniquement de la fabrication mais également de la mise sous capsule, et cette opération est onéreuse. En outre, il faut comparer ce prix de revient à celui du principal concurrent de ces deux radioisotopes, qui est actuellement le cobalt-60.

Bien que sa période soit quatre fois moins élevée que celle du césium, le cobalt-60 donne des rayons gamma plus intenses, si bien qu'il faut environ quatre fois plus de césium pour obtenir la même quantité de rayonnement. Ce produit est fabriqué dans divers réacteurs - cela dépend de l'intensité du flux. On en trouve toute une gamme d'activités spécifiques - de deux à plusieurs centaines de curies par gramme - la plus élevée étant utilisée principalement pour les applications médicales, dans lesquelles la source au cobalt doit avoir une forme concentrée. Le cobalt constitue généralement une excellente source de rayonnements se prêtant à des usages très divers et facile à manipuler.

Passons maintenant aux installations d'irradiation. Les premières cellules utilisées étaient relativement simples, mais il a fallu leur adjoindre toute une « quincaillerie » pour les rendre sûres. L'une des premières usines pilotes fournissait des baguettes contenant du cobalt dont on pouvait changer la configuration. On pouvait les élargir, de manière à augmenter le volume et à diminuer l'exposition, et vice versa.

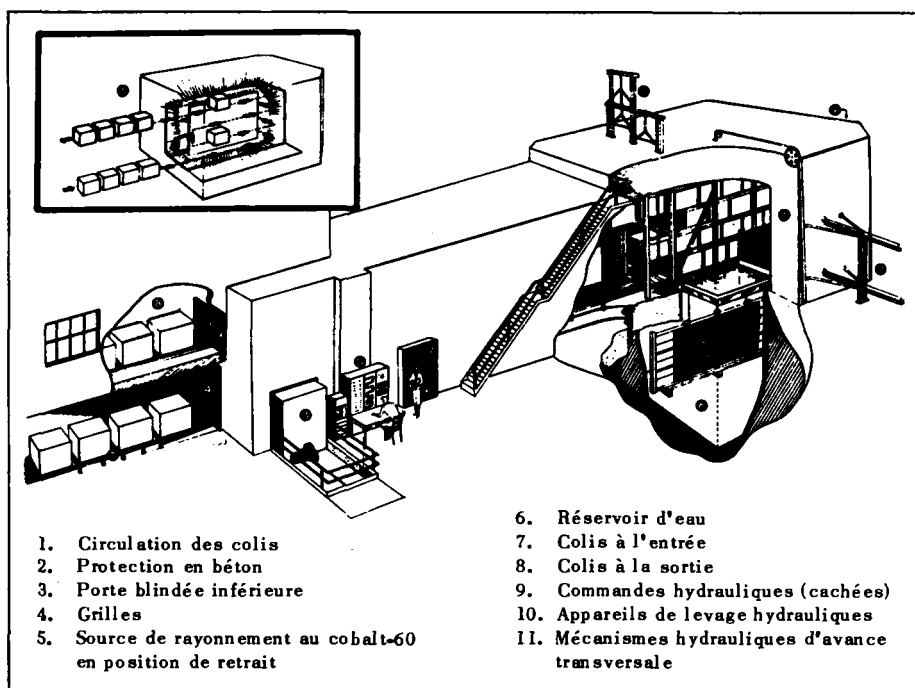
## LES GRANDS IRRADIATEURS

L'utilisation du cobalt s'est développée avec la construction d'usines d'irradiation dans plusieurs pays du monde. Le cobalt lui-même tend à passer au second plan, parce que maintenant la partie la plus importante et la plus apparente est la « quincaillerie » nécessaire pour faire progresser la matière irradiée dans l'usine. Le problème est d'utiliser au mieux les rayonnements dont l'émission ne cesse jamais ; pour cela, toutes les matières à irradier doivent être manipulées dans l'usine de la manière la plus appropriée. On met au point de nouvelles usines qui sont de plus en plus automatisées et aussi de plus en plus onéreuses ; le coût du cobalt lui-même n'entre plus guère en ligne de compte parce que maintenant l'élément essentiel du prix de revient est l'usine elle-même avec tous les appareils mécaniques et systèmes de sécurité.

La première de ces usines utilisant le cobalt (construite en Australie) sert à stériliser, par mesure d'hygiène, les poils de chèvre dont on veut faire des tapis. Cette usine possède plus d'un demi-million de curies de cobalt-60 ; on l'utilise également depuis quelque temps pour l'irradiation des fournitures médicales, etc.

Mon intention n'est pas de dresser la liste de toutes les matières qui peuvent être irradiées, mais de parler du développement de ces grandes sources d'irradiation et de leurs possibilités sensationnelles.

Le plus grand irradiateur se trouve, sauf erreur, aux Etats-Unis. Il sert à irradier les aliments et contient une source de 1,3 mégacuries. Dans



Usine d'irradiation gamma, exploitée en Australie depuis 1960. Plan général et schéma de circulation des colis à irradier.

ce pays, la Food and Drug Administration (Service de contrôle sanitaire des aliments et produits pharmaceutiques) a autorisé la consommation de certains aliments irradiés, après avoir fixé l'exposition à ne pas dépasser.

Il y a d'autres usines de ce type en Grande-Bretagne - l'une à Edimbourg et l'autre dans le sud de l'Angleterre, pour le traitement des fournitures médicales. Mais il existe aussi plusieurs machines électriques. Elles présentent des avantages et des inconvénients. Elles permettent de soumettre un petit volume de matières à une exposition très élevée pendant un court laps de temps. Toutefois, les machines électriques, du type Van de Graaff par exemple, présentent l'inconvénient d'exiger une alimentation haute tension, ce qui entraîne le risque de pannes. Les accélérateurs - principalement des accélérateurs linéaires - fonctionnent dans la même gamme d'énergies, de 4 à 25 MeV; ceux que l'on utilise à cette fin ont une puissance qui atteint normalement 30 kW. Dans une usine d'irradiation dotée d'un accélérateur, on se heurte, comme dans l'usine d'irradiation au cobalt, au très grave problème de faire passer toutes les boîtes - ou tous autres objets à irradier - dans le faisceau de rayonnements généralement très étroit.

Enfin, il existe un appareil plus récent, le dynamitron. Son principal avantage réside dans sa faible capacité - quantités relativement faibles

d'énergie accumulée - et, par conséquent, dans le fait qu'il est moins sujet aux pannes. Le constructeur affirme qu'il est plus fiable que les autres appareils. Il fonctionne lui aussi à des énergies de 1 à 3 MeV et sa puissance se situe généralement entre 30 et 100 kW.

## CHIMIE ET RAYONNEMENTS

Sans m'étendre davantage sur les irradiateurs actuellement disponibles, je passerai au principal sujet de cette causerie qui est la chimie, domaine dans lequel les rayonnements peuvent être utilisés avec avantage.

Très souvent le rayonnement modifie le composé chimique qu'il vient frapper. Des recherches fondamentales considérables sont nécessaires dans ce domaine avant que l'on ne puisse - en supposant qu'on y parvienne un jour - faire naître une nouvelle industrie de la radiochimie. Les composés qui ont fait l'objet des premières recherches sont les polymères qui ont les plus grosses molécules; pour cette raison, ces substances permettent d'obtenir le rendement le plus élevé pour une irradiation donnée. On a commencé par les polyéthylènes. Sous l'effet de l'irradiation, ces molécules en chaîne se lient les unes aux autres, ce qui a pour effet la constitution de molécules encore plus grandes ayant des propriétés physiques totalement différentes: par exemple, leur souplesse et leur point de fusion. Des objets en polyéthylène peuvent supporter des températures atteignant 120°C s'ils ont été irradiés; dans le cas contraire, ils ne le peuvent pas. On utilise généralement du polyéthylène irradié pour les cartouches de crayons à bille afin d'empêcher qu'elles ne se fissurent sous l'action du solvant de l'encre. Beaucoup de personnes ont ainsi dans leur poche un objet irradié, sans même s'en douter.

Un deuxième exemple qui est également d'un grand intérêt et d'une application courante est l'effet «mémoire». Du polyéthylène irradié peut être déformé et refroidi; si on le chauffe pour le ramener à une certaine température, il recouvre sa forme primitive. Ce phénomène est utilisé pour l'emballage; si l'on veut emballer très étroitement, on peut utiliser l'effet «mémoire» pour faire adhérer l'emballage au produit. Avec une matière plastique transparente, on peut obtenir un bel emballage serré - vous avez certainement vu des marchandises emballées de cette manière et vous vous êtes peut-être demandé comment on pouvait obtenir cet effet esthétique.

Je dirai maintenant quelques mots de produits susceptibles d'acquérir une importance considérable: les élastomères. Ce sont des caoutchoucs à liaison transversale. La vulcanisation du caoutchouc est une opération extrêmement délicate parce qu'elle fait intervenir le soufre. Si vous devez changer vos pneus si souvent, c'est principalement parce que leur caoutchouc contient du soufre. Aussi a-t-on eu très tôt l'idée de vulcaniser les pneus par les rayonnements. Mais il faudrait pour cela une dose excessivement forte - environ 10 mégarads. A l'époque, c'est-à-dire en 1957-58, on avait calculé le coût d'un réacteur construit pour le seul usage d'un fabricant de pneus, afin de voir si cette opération serait rentable. On s'est aperçu qu'elle ne l'était pas. Mais depuis on a fait des découvertes inté-

ressantes. En ajoutant certaines matières, on peut ramener l'exposition nécessaire de 10 millions à 1 million de roentgens environ, ce qui suppose bien entendu que ces produits d'addition ne seront pas plus nuisibles aux pneus que le soufre dont on cherche à se passer par cette technique.

## VULCANISATION PAR LES RAYONNEMENTS

La vulcanisation par les rayonnements constitue un exemple de la façon dont la question évoluera. Beaucoup d'applications des rayonnements ne sont pas actuellement rentables - c'est en fait le cas de la plupart - mais elles peuvent le devenir lorsque l'on aura trouvé les produits d'addition à introduire dans ces systèmes chimiques assez complexes, afin de diminuer l'exposition nécessaire pour obtenir l'effet voulu. Bien souvent, il est difficile de prévoir quelle sera l'action de ces produits.

Les publications consacrées à la question donnent très peu d'indications et c'est bon signe. Si elles sont muettes, c'est que beaucoup de sociétés y travaillent et gardent secret le résultat de leurs recherches. Si l'on trouve beaucoup d'articles consacrés à l'irradiation de l'eau, on peut être sûr que cette question présente dans l'ensemble peu d'intérêt pour l'industrie. Il faut passer régulièrement au crible toutes les publications spécialisées pour se rendre compte de ce qu'elles laissent dans l'ombre, car c'est généralement ce qui est le plus intéressant. Or, il y a actuellement très peu d'articles sur le caoutchouc. L'industrie doit donc être sur le point d'adopter un procédé concurrentiel dans lequel l'exposition nécessaire sera encore moindre que le chiffre déjà cité. Je ne serais pas surpris si, dans quelques années, on trouvait dans le commerce des pneus radiovulcanisés, ne contenant plus de soufre, qui dureraient deux fois plus que les pneus actuels. Ce serait là l'une des plus importantes applications des rayonnements et il se pourrait que l'on construise des réacteurs spécialement pour l'industrie caoutchoutière. Le même résultat pourrait également être obtenu avec des sources de rayonnements très intenses, mais les fabricants de pneus ont une production telle qu'ils pourraient bien avoir besoin de réacteurs spéciaux: ainsi, on aura peut-être non seulement des réacteurs de dessalement, mais aussi, par exemple, des réacteurs pour pneumatiques.

Il y a d'autres élastomères, comme les polymères de silicone, qui se prêtent très facilement à la vulcanisation parce qu'une dose de rayonnements très faible suffit. Autre application pouvant avoir une incidence sur l'industrie du pneu: le traitement du nylon. Les fils de nylon pour pneus sont améliorés par irradiation et cela peut aussi jouer un rôle très important dans l'avenir de cette industrie. Enfin, il y a les esters de polyvinyle qui peuvent être irradiés de manière à obtenir un élastomère, et on peut ainsi fabriquer des pneus en caoutchouc artificiel. Cette technique est à l'essai depuis un certain temps, mais il est difficile de savoir dans quelle mesure elle a progressé parce qu'il n'y a pas d'articles très détaillés sur cette question.

Normalement, l'irradiation produit une dégradation qui est généralement désavantageuse. Mais il y a aussi des exceptions. Par exemple, le dextrane est une très grosse molécule - trop grosse pour le plasma sanguin ; si on l'irradie avec la dose voulue, elle se scinde et l'on obtient une molécule ayant exactement la masse moléculaire qu'il faut pour pouvoir se substituer au plasma. Cette méthode donne d'excellents résultats. Inversement, un monomère peut être polymérisé par irradiation. Un composé relativement simple tel que le N-vinyle pyrrolidone peut l'être de manière à obtenir une substance ayant la masse moléculaire voulue pour remplacer le plasma. La troisième méthode est la polymérisation par greffe, qui permet d'obtenir également des molécules de la taille souhaitée.

Ainsi, on peut fabriquer du plasma sanguin par trois méthodes totalement différentes : par dégradation, par polymérisation simple et par greffe. La polymérisation par greffe reçoit des applications importantes également dans l'industrie des peintures et il y a toute une série de matières qui peuvent être irradiées, si bien que nous aurons probablement bientôt des peintures possédant des qualités adhésives bien supérieures.

Il existe d'autres applications importantes dans l'industrie des hydrocarbures, notamment le cracking par irradiation.

Tous ces procédés se prêtent à l'emploi des sources dont j'ai déjà parlé, par exemple des grandes sources au cobalt (sauf pour le caoutchouc où l'on aura sans doute besoin de réacteurs spéciaux à cause du volume de matières à traiter). Si une énergie plus considérable est nécessaire, on aura recours aux fragments de fission. Les énergies gamma normales sont de l'ordre de 1,0 à 1,7 MeV, alors que l'énergie des fragments libérés par la fission de l'uranium-235 est de 162 MeV. On peut construire des usines chimionucléaires produisant cette énergie, mais cela pose des problèmes techniques très ardues. Des expériences intéressantes ont permis de préparer certains composés de cette manière. Je dois dire qu'on est encore au stade de la recherche, mais on peut très bien imaginer que plus tard, on pourra employer les fragments de fission d'une manière tout à fait rationnelle à cette fin.

## RADIOSYNTHESE

Une autre utilisation importante des rayonnements est la catalyse ; on peut citer comme exemple remarquable l'emploi d'une source relativement peu intense (18000 curies) pour la synthèse du bromure d'éthyle à partir de l'acide bromhydrique et de l'éthylène. On a fait beaucoup de recherches sur toutes sortes de bromures, mais à ma connaissance c'est là la première synthèse industrielle d'un composé organique par irradiation.

D'une manière générale, la synthèse chimique a évolué comme suit au cours des 100 dernières années : on a commencé par utiliser principalement des variations de température et de pression - par exemple dans la préparation sous vide, puis on a eu recours à l'électricité (arc électrique ou passage d'un courant), enfin depuis 1900 aux catalyseurs. On n'a pas employé d'autres méthodes et c'est ainsi qu'on fait encore couramment la

synthèse de tous les composés au nombre d'un million environ produits actuellement.

Maintenant, on dispose d'un moyen entièrement nouveau, l'irradiation, qui n'a rien de commun avec la température ou la pression. Il n'est pas surprenant qu'après 10 années de recherches on ne soit pas encore très avancé parce que l'interaction des rayonnements et de la matière a des effets multiples. Les rayonnements frappent tout ce qu'ils rencontrent avec une énergie généralement beaucoup plus élevée que l'énergie de liaison de la molécule, si bien que l'on doit « trier » les effets. Mais c'est la première fois que l'on peut mettre en oeuvre une méthode entièrement nouvelle pour la préparation des composés chimiques, et c'est ce qui rend l'entreprise passionnante. Les hautes températures accélèrent le mouvement des molécules ; le vide allonge leur parcours moyen ; mais les rayonnements ont une action totalement différente. Les molécules peuvent se scinder, se lier transversalement, se combiner, libérer des radicaux ; c'est une chimie entièrement nouvelle qui naît sous nos yeux. Cette application des rayonnements me semble appelée à un grand avenir - un avenir sans commune mesure avec les modestes résultats déjà obtenus.

Les rayonnements ont, bien entendu, un effet très marqué sur la matière vivante et c'est cette propriété dont on tire parti lorsque l'on irradie des fournitures médicales. Tout ce qui ne peut pas être stérilisé facilement par la chaleur, à cause du risque de décomposition, peut être stérilisé par les rayons ultraviolets (mais leur pénétration est faible) ou par le rayonnement  $\beta$  ou les rayons gamma qui, pénétrant plus profondément, sont plus utiles. Cette fois les rayonnements ne créent pas quelque chose de nouveau - ils tuent purement et simplement. Naturellement, ils ne tuent pas tout ; lorsque l'on emploie le mot stériliser il faut savoir ce qu'il signifie. Si l'on irradie des bactéries, leur nombre est diminué dans la même proportion pendant chaque intervalle de temps pendant lequel l'objet est exposé. Autrement dit, après un certain laps de temps, il est encore réduit d'un dixième, après un nouveau laps de temps égal au précédent il est encore réduit d'un dixième, etc., mais on ne tue jamais la dernière bactérie. En toute rigueur, on ne devrait donc pas employer le mot « stériliser ». On diminue le nombre de bactéries dans une certaine proportion et une question prête à controverse entre les utilisateurs de rayonnements pour la stérilisation : comment savoir où l'on en est exactement ? Cela dépend beaucoup de l'état du produit au départ. S'il est très contaminé, par exemple s'il contient  $10^7$  bactéries, on peut ramener ce chiffre à  $10^5$ , mais on a toujours un produit contaminé. Si l'on commence, comme c'est le cas le plus courant, avec seulement un petit nombre de bactéries et que ce nombre soit réduit d'un facteur de  $10^2$ , par exemple, on peut évidemment le considérer comme stérile après l'opération.

## UTILISATIONS MEDICALES

Dans plusieurs pays, il existe des firmes industrielles qui se consacrent uniquement à la stérilisation des fournitures médicales (sondes,



seringues, etc.) soit avec des accélérateurs, soit avec des sources au cobalt. Une société américaine qui avait entrepris ce genre d'activité a remplacé les accélérateurs par des sources au cobalt parce qu'elles sont plus fiables. Après de nombreuses expériences, effectuées surtout sur les bactéries les plus radiorésistantes, la société a constaté qu'une énergie de 2,5 millions d'électrons-volts permet de réduire le nombre des bactéries d'un facteur de  $10^7$ . Elle a aussi fait procéder à des sondages sur la chaîne des produits avant irradiation pour déterminer combien de bactéries à peu près ces produits portaient; selon les résultats obtenus, elles sont normalement très peu nombreuses; par conséquent, après irradiation, une seringue, sur 1 ou 5 millions ou un chiffre de cet ordre, portera peut-être encore une bactérie.

En médecine, on utilise aussi les méthodes d'irradiation à d'autres fins, par exemple pour la greffe des vaisseaux artériels. On n'y procède pas encore en grand et c'est surtout la greffe du tissu osseux qui est pratiquée. On peut facilement stériliser des greffes osseuses par irradiation et, dans un seul hôpital, 1 000 malades ont reçu des greffes osseuses irradiées. Chez un ou deux d'entre eux, on a trouvé des micro-organismes, mais ils ne provenaient pas de la greffe osseuse. On irradie également les ligatures pour sutures chirurgicales: l'avantage est qu'on emballé le produit avant de l'irradier, ce qui empêche toute contamination. Certaines préparations pharmaceutiques sont difficiles à stériliser par la chaleur; ce sont principalement des antibiotiques qui, en revanche, résistent aux rayonnements - du moins jusqu'à un certain point. Naturellement, il faut savoir quelle partie du composé résiste et laquelle est modifiée, et n'utiliser que les composés dans lesquels les bactéries sont détruites, mais qui ne sont ni endommagés ni rendus inactifs.

Il y aurait aussi beaucoup à dire sur les applications agricoles, mais je me bornerai à mentionner que l'on peut arrêter toute germination dans les artichauts, les pommes de terre et les oignons, stériliser les sols, améliorer les végétaux et conserver les aliments au moyen des rayonnements. On peut aussi détruire les animaux et plantes nuisibles, par irradiation et par la méthode de la stérilisation des mâles.

On voit que le nombre des applications des sources de rayonnements est presque illimité, qu'il s'agisse de chimie, de fournitures et préparations médicales ou d'agriculture. Je pense personnellement que les rayonnements joueront leur rôle le plus décisif dans le domaine des élastomères et des matières plastiques. J'ai seulement essayé de procéder à un bref tour d'horizon et de montrer combien le sujet est passionnant. Les rayonnements constituent un nouvel outil qui peut nous apporter les plus grands avantages.