Perspectives ouvertes à l'application des isotopes et des rayonnements

par Hellmut Glubrecht

Depuis une trentaine d'années, les isotopes reçoivent dans notre monde scientifico-technique des applications chaque jour plus nombreuses dont le grand public ignore probablement l'ampleur et la variété. Cependant, rares sont les secteurs de la recherche scientifique, de l'agriculture, de la médecine et de l'industrie qui n'ont pas, d'une façon ou d'une autre, tiré parti de ces outils modernes aux multiples usages dont disposent la science et la technique. L'électronique et l'informatique d'aujourd'hui sont probablement les seules innovations qui aient aussi largement influé sur les techniques.

L'emploi des rayonnements ionisants est étroitement lié aux isotopes radioactifs, qui constituent la source de ces rayonnements la plus fiable, la moins coûteuse et la plus économe d'énergie. Sans doute, les rayonnements ionisants produits par des sources électroniques sous forme de rayons X étaient-il déjà appliqués il y a vingt ou trente ans. Mais les sources radioactives puissantes de l'ordre de la kilocurie ne sont apparues que lorsqu'on a pu les produire dans des réacteurs de recherche, c'est-à-dire vers la fin des années cinquante.

Entre temps, de nombreuses applications des isotopes et des rayonnements sont devenues courantes. Cependant, toutes les virtualités de cette branche des techniques nucléaires ne sont pas encore épuisées. Nous décrirons ci-dessous certaines des perspectives à entrevoir quant à leur développement et à leurs applications futurs eu égard aux orientations nouvelles que l'on peut prévoir aussi bien en méthodologie que dans les domaines d'application.

TENDANCES GENERALES EN METHODOLOGIE DES ISOTOPES ET DES RAYONNEMENTS

Les isotopes ont cet avantage qu'ils permettent de différencier des atomes appartenant au même élément mais qui diffèrent par leur origine et leur voie de cheminement au sein d'un système complexe. Ils sont en outre remarquables par la sensibilité extrême des méthodes de détection. Ces deux propriétés se conjuguent idéalement lorsqu'on emploie les isotopes radioactifs comme indicateurs. Il est certain que les isotopes radioactifs seront, comme traceurs, utilisés de plus en plus, d'autant que l'on dispose, en quantités plus importantes, de radioisotopes produits par des bombardements de protons dans les cyclotrons.

Par ailleurs, le recours aux isotopes stables rares tels que le carbone 13, l'azote 15, l'oxygène 18, le soufre 34, le calcium 48, le fer 58, etc. comme traceurs tend à se répandre. Les isotopes stables ont en effet l'avantage de ne pas influer par rayonnement sur les échantillons marqués (particulièrement les échantillons biologiques) ou sur le milieu. En outre, leur emploi n'est pas limité dans le temps par la décroissance radioactive. Toutefois, ils étaient jusqu'à présent assez coûteux et les instruments de détection, comme les spectromètres de masse ou les dispositifs optiques étaient d'un prix élevé ou bien manquaient

---

M. Glubrecht est professeur à l'Institut für Biophysik de la Technische Universität de Hanovre (République fédérale d'Allemagne). Il a été Directeur général adjoint du Département de la recherche et des isotopes de l'AIEA de 1973 à 1977.

de précision. Il est actuellement remédié à ces inconvénients et l'on est parvenu déjà à une sensibilité de détection bien supérieure à quelques millionièmes.

Une autre méthode de mesure des isotopes stables rares est fondée sur l'analyse par activation nucléaire qui présente souvent l'avantage d'être non destructive. Dans nombre d'applications, l'indicateur sert uniquement à localiser des corps tels que particules de poussière, micro-organismes, pollen, insectes ou même poissons. Si l'échantillon marqué ne doit pas être soumis à des traitements chimiques, on peut employer n'importe quel indicateur activable, c'est-à-dire l'une quelconque des terres rares comme Dy, Eu, In, La ou autre pourra servir d'indicateur et être détectée au moyen de l'analyse par activation nucléaire. Cette méthode par activation de l'indicateur peut être prometteuse et c'est sans doute en recherche écologique qu'elle sera le plus largement appliquée. Avec les réacteurs de recherche, on dispose maintenant dans le monde de puissantes sources de neutrons pour l'activation.

D'autres progrès importants ont été accomplis qui permettent de mieux mesurer les rapports isotopiques dans la nature ou dans l'environnement. C'est en hydrologie isotopique que les choses ont commencé. Les modifications relatives, parfois infimes, de concentration ou de rapport dans la composition isotopique d'un élément fournissent des renseignements remarquables, non seulement en hydrologie mais encore dans d'autres domaines comme la prospection minière ou l'écologie. Nous assistons, semble-t-il, aux débuts d'une nouvelle discipline fondée sur l'emploi d'un indicateur extrêmement sensible que nous offre la nature pour étudier les processus physico-chimiques.

La méthodologie marque une autre orientation importante avec l'emploi des rayonnements ionisants pour l'analyse et le traitement. L'analyse par rayonnements ionisants a trouvé sa première application dans le diagnostic médical, pour être ensuite étendue aux essais non destructifs, à la mesure de la densité et de l'humidité des sols et à l'étude de certains problèmes biologiques. Les applications médicales mêmes ont progressé récemment à la suite de l'adoption de la tomographie par ordinateur. Les jauges qui doivent servir dans les procédés industriels seront simplifiées et améliorées. L'interaction des neutrons et de la matière trouvera des applications pratiques de plus en plus nombreuses, surtout si l'on continue à disposer de sources de californium 252. L'agriculture commence à peine à appliquer les méthodes de scintigraphie pour déterminer la structure de la biomasse et des plantes.

L'analyse chimique par rayonnement peut s'appuyer sur l'analyse par activation et sur les techniques de fluorescence X avec dispersion d'énergie. L'analyse par activation nucléaire a été souvent limitée à l'irradiation par neutrons thermiques. Cependant, les neutrons rapides, les particules chargées et les rayons gamma de haute énergie (produits par des accélérateurs) offrent des possibilités d'activation considérables encore inexploitées, de même d'ailleurs que l'application des rayonnements instantanés à la détection. La technique de fluorescence X avec dispersion d'énergie s'est imposée ces dernières années en recourant à l'excitation par protons plutôt qu'aux rayons X ou aux électrons. Elle complètera sans aucun doute l'analyse par activation nucléaire et concurrencera fortement les méthodes d'analyse chimique.

Le traitement par les rayonnements trouve actuellement des applications industrielles à grande échelle. Il a pour caractéristique d'économiser l'énergie et d'avoir des effets très homogènes, ce qui lui donne dans la plupart des cas la supériorité sur le traitement thermique. La radiostérilisation des produits chimiques est désormais de pratique courante, cependant que la conservation des aliments par irradiation devient une activité de premier plan. La recherche intensive sur l'interaction des rayonnements avec les macromolécules offrira très probablement de nouvelles possibilités d'améliorer diverses propriétés des matières industrielles. Le traitement des eaux usées par irradiation est aussi à prévoir.

On découvrira peut-être à l'avenir que les rayonnements ionisants ont d'autres effets utiles inattendus. Ainsi, l'on a récemment constaté que des doses relativement faibles pourraient agir favorablement sur la différenciation des plantes obtenues par culture de tissus. Si les résultats actuels se confirment, cette méthode pourrait, en phytogénétique, ouvrir une ère nouvelle.

APPLICATIONS AGRICOLES

Bien que les techniques isotopiques et les techniques d'irradiation soient déjà très largement exploitées en agriculture, c'est probablement dans ce domaine qu'elles se développeront le plus à l'avenir. En effet, d'une part, la production agricole demeure encore fortement attachée aux méthodes traditionnelles, d'autre part, l'agriculture met en jeu des systèmes extrêmement complexes aux éléments nombreux encore inexplorés.

L'emploi accru des isotopes stables,qui nous a déjà tout appris sur l'acide nucléique et le métabolisme des protéines, est particulièrement utile à l'étude du rôle d'éléments tels que le carbone, l'azote, l'oxygène et le soufre. L'azote 15 gardera aussi une importance extrême dans la solution de problèmes nouveaux et pourrait, dans certains cas, être complété par son isotope radioactif de courte période, l'azote 13. L'une des entreprises les plus ardues en agriculture est d'induire la quantité d'azote moléculaire de l'air fixée par les plantes non légumineuses. La méthode classique de réduction par l'acétylène ne permet pas de mesurer la quantité totale d'azote moléculaire fixée au cours du cycle végétatif d'une plante. Cette quantité ne peut être mesurée qu'au moyen d'isotopes de l'azote.

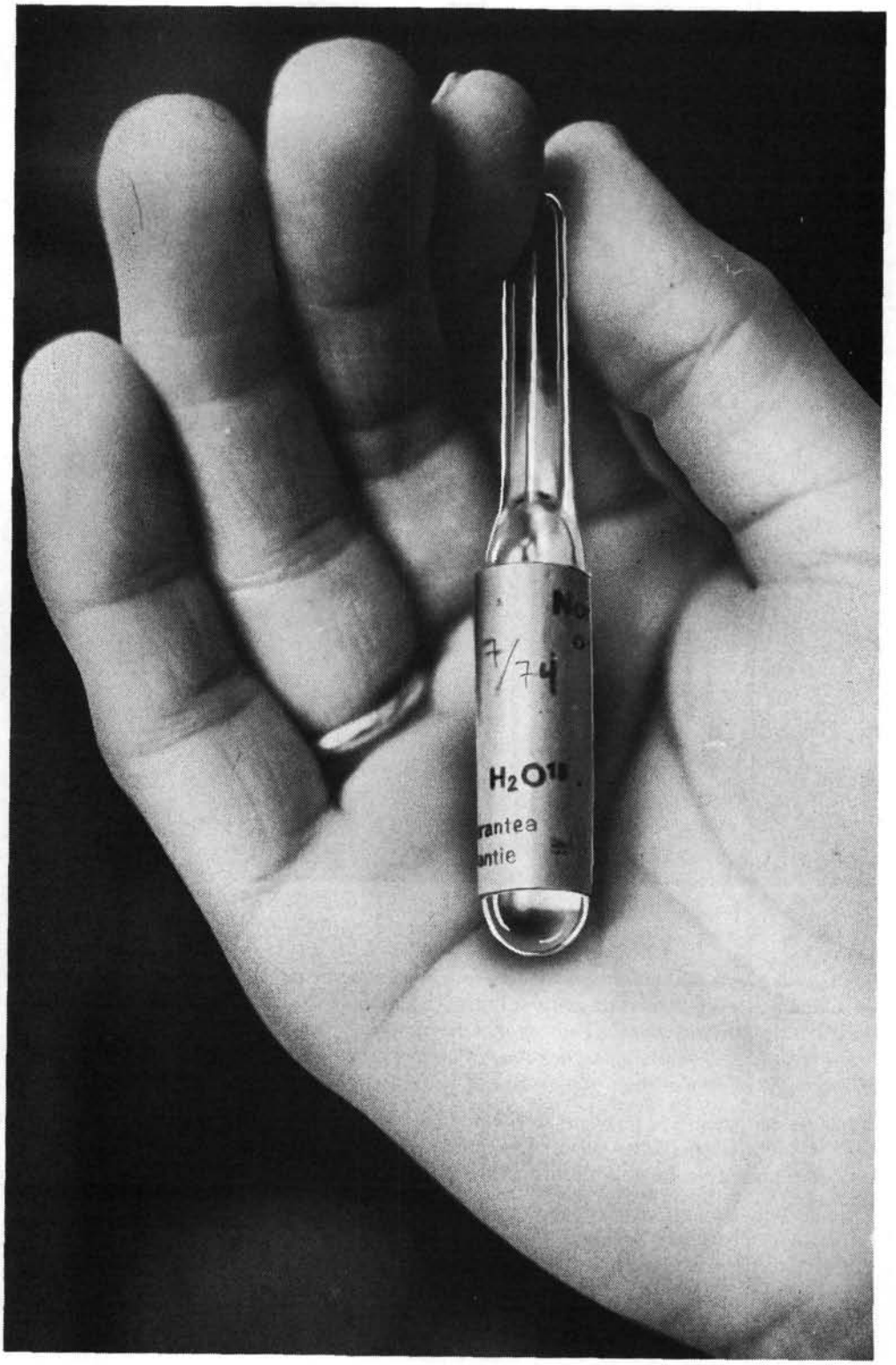
Les composés marqués à l'aide d'isotopes stables peuvent également servir à étudier sur le terrain le devenir et le métabolisme des résidus de pesticides ainsi qu'à faire des expériences de longue durée sur la nutrition animale.

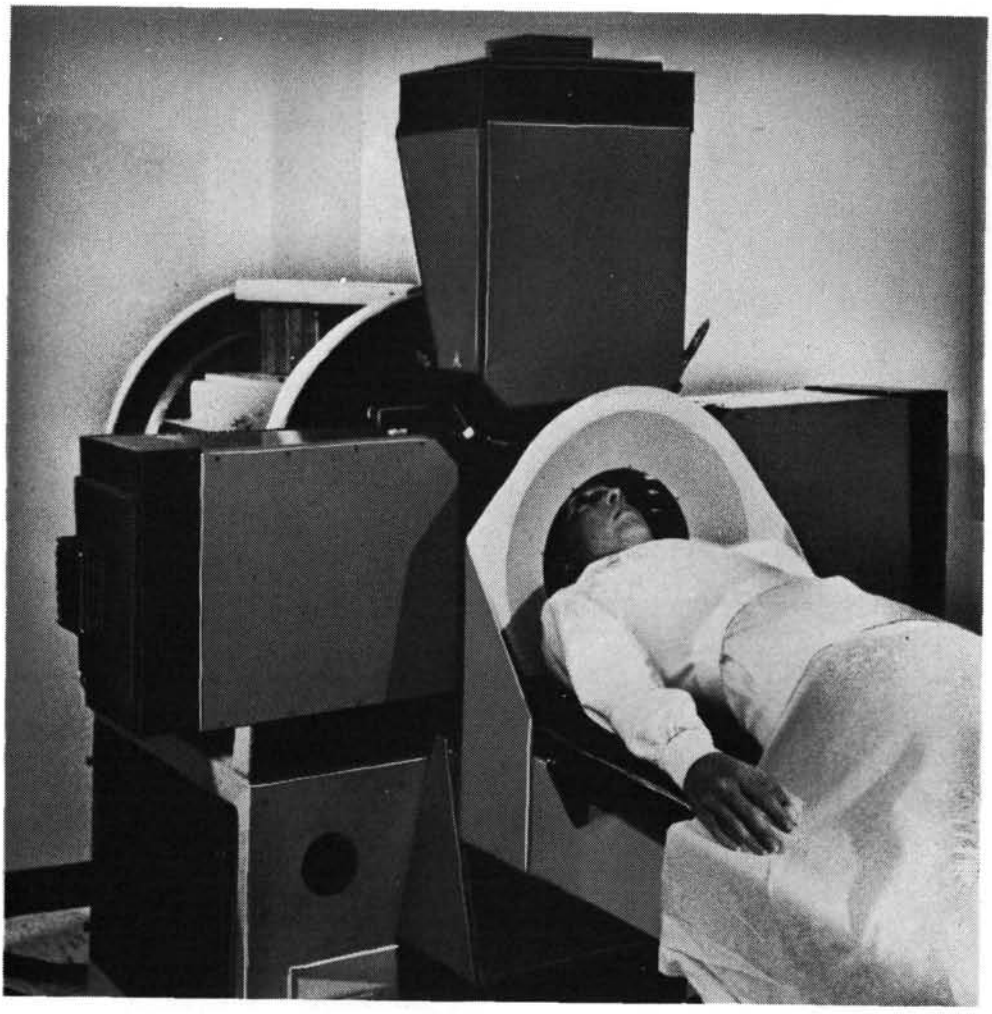
Les isotopes radioactifs conserveront un rôle de premier plan dans la recherche des oligo-éléments et particulièrement dans les études sur l'interaction et la synergie de divers oligo-éléments présents dans le sol, les plantes et les animaux. L'emploi de substrats et d'agents réactifs marqués par des isotopes radioactifs deviendra indispensable dans la recherche sur les enzymes. C'est déjà le cas en physiologie animale où l'on applique des techniques de radioimmunodosage, mais ces méthodes pourraient utilement être étendues à la surveillance de la contamination des aliments et du sol.

On commence seulement, en recherche agricole, à mesurer des rapports isotopiques, par exemple $^{18}O/^{16}O$ pour l'étude de la respiration. L'étude de la composition isotopique des contaminants à base de plomb en agriculture indiquera si cette contamination est due aux gaz d'échappement des véhicules automobiles ou, au contraire, au plomb naturellement présent dans le milieu. A l'avenir, cette méthode très efficace recevra sans aucun doute d'autres applications multiples.

Parmi les nombreuses autres applications possibles des isotopes en agriculture, on doit mentionner le marquage non radioactif en écologie. Il faut, pour lutter contre les insectes, bien connaître la migration et le comportement des animaux. Les indicateurs activables, dont il a été question plus haut, conviennent parfaitement à ce genre d'étude sur le terrain et seront certainement utilisés de plus en plus. Il faut également espérer que les résultats passionnants obtenus en ichtyologie dans le marquage des saumons à l'europium, au samarium et au dysprosium, encourageront les spécialistes de la pêche à continuer dans cette voie.

Une des premières applications pratiques des radioisotopes a porté sur leur emploi en tant que traceurs dans l'étude des échanges chimiques et biologiques. De nos jours, on a de plus en plus tendance à employer comme traceurs des isotopes rares mais stables (c'est-à-dire non radioactifs). On voit ici un échantillon d'eau contenant de l'oxygène 18, isotope stable, au lieu d'oxygène 16, isotope plus courant. Photo: Norsk Hydro.

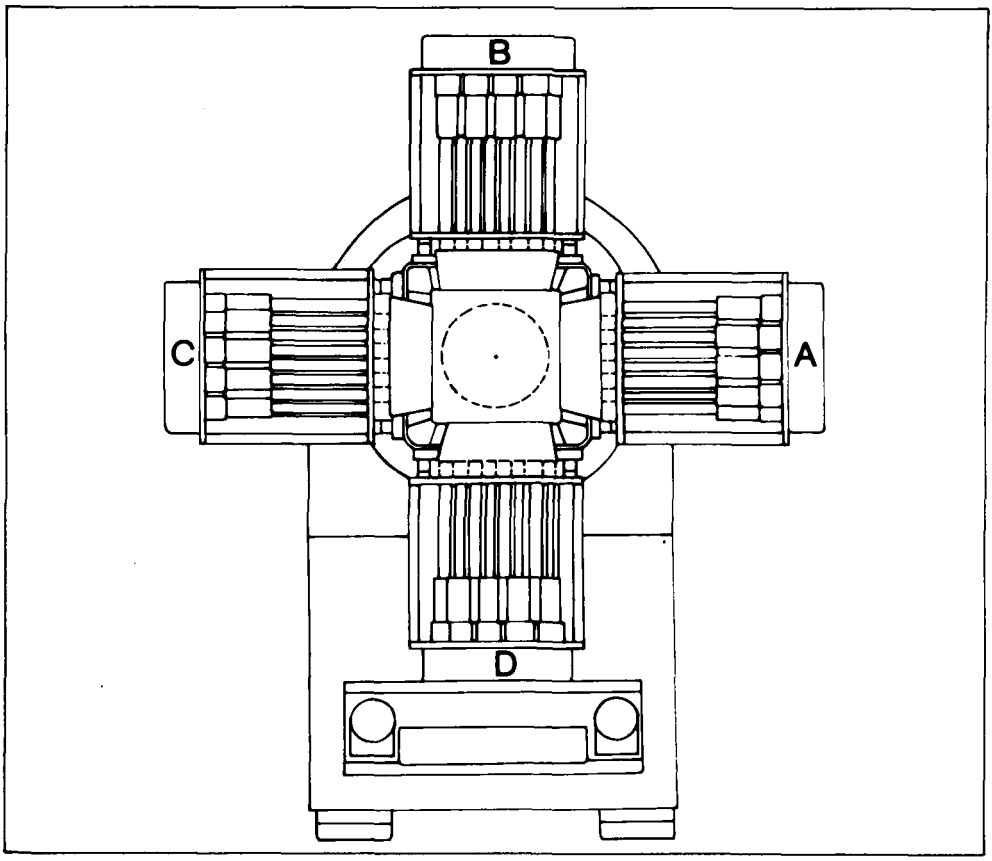

H_2O^{18}



Parmi les analyses perfectionnées fondées sur les rayonnements, on peut citer une méthode de scintigraphie qui permet de mesurer la répartition de la biomasse dans les céréales à tous les stades de leur croissance. D'autres expériences peuvent servir à vérifier l'influence de divers engrais et des variations climatiques. On met au point en sylviculture des méthodes analogues de scintigraphie en vue de déceler les parties malades des troncs d'arbres.

L'analyse par irradiation convient aussi particulièrement à la surveillance des variations diurnes de la rétention d'eau par les plantes et les sols qu'il sera extrêmement important de connaître pour développer la culture sèche.

L'application la plus importante du traitement par rayonnement en agriculture est la conservation des aliments par irradiation. Le Comité du Codex Alimentarius de la FAO et de l'OMS achève actuellement d'examiner l'application de cette méthode à un certain nombre de produits alimentaires. Les prochains travaux devront essentiellement apporter la preuve de la comestibilité d'autres aliments. Toutefois, ils revêtiront un caractère plus fondamental et auront trait aux effets des rayonnements sur les composants des aliments en général

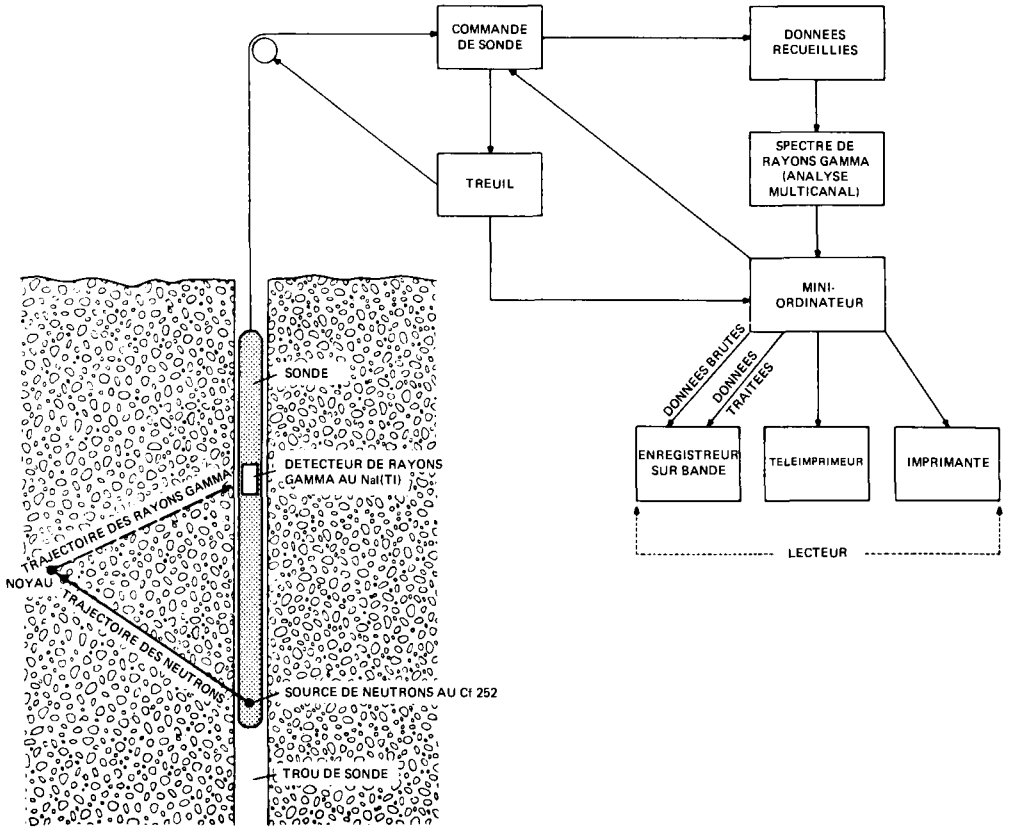


Cet appareil automatisé de tomographie à l'aide de radionucléides, du Centre des sciences médicales de l'Université de Californie à Los Angeles, sert à étudier la circulation du sang dans le cerveau et le métabolisme cérébral du glucose. L'image reconstituée, ou tomogramme, donne une coupe du cerveau, et une série de tomogrammes pris sur des plans différents permet d'obtenir une image du cerveau en trois dimensions. L'appareil comprend quatre détecteurs. Les radionucléides utilisés sont le ^{99m}Tc, le ^{123}I, le ^{111}In et le ^{18}F.

afin de prouver que l'irradiation généralisée des aliments est admissible jusqu'à une certaine dose. Il sera fait une plus large place à des études pratiques à grande échelle sur la factibilité technique et économique. La recherche portera sur un système de conservation intégré qui associe le traitement thermique à l'irradiation.

Une autre méthode prometteuse consiste à irradier les déchets pour en faire des aliments destinés aux animaux. L'irradiation des eaux usées pourrait déboucher sur la production accrue d'engrais riches en matières organiques.

L'application des rayonnements en agriculture est probablement appelée à progresser dans deux domaines: la phytogénétique et le lâcher d'insectes stérilisés, grâce à l'irradiation par les neutrons qui remplaceraient les rayons gamma. On a constaté sur les mouches tsé-tsé qu'il était préférable, pour stériliser les insectes mâles, de remplacer les rayons gamma par les neutrons qui, administrés à dose modérée, entraînent moins de troubles physiologiques chez les sujets qui, bien que stériles, peuvent parfaitement rivaliser avec les mâles à l'état sauvage.



On peut déterminer la teneur des dépôts de nickel ou de cuivre par sondages au cours desquels on mesure les émissions de rayons gamma induites par la capture de neutrons. On fait descendre une source de neutrons dans un trou de sonde et on mesure les émissions gamma correspondantes à l'aide d'un scintillateur. Ces techniques nucléaires permettent de caractériser un plus grand nombre d'échantillons plus représentatifs que ne le permettent généralement les méthodes de sondage classiques.

APPLICATIONS MEDICALES

Dans la plupart des pays industrialisés, la médecine nucléaire atteint maintenant un niveau de développement élevé. Sans doute, l'instrumentation employée est-elle assez compliquée et coûteuse. Cependant, les méthodes de diagnostic fondées sur l'énergie d'origine nucléaire présentent des avantages considérables par rapport aux méthodes classiques, car elles fournissent beaucoup plus de renseignements. En outre, elles présentent moins d'inconvénients pour les malades. Il serait donc extrêmement souhaitable de simplifier le matériel de médecine nucléaire et de l'adapter aux conditions de travail particulières aux pays en développement tropicaux ou subtropicaux. C'est à cette tâche qu'est actuellement consacré un élément de programme important de l'AIEA.

Mais de nouveaux progrès considérables sont aussi à prévoir dans le domaine médical. La visualisation *in vivo,* au moyen de radionucléides, telle qu'elle est obtenue par scintigraphie, ne renseigne que sur la répartition locale d'un produit pharmaceutique radiomarqué. Les études dynamiques des processus fonctionnels et physiologiques nécessitent l'emploi de caméras à rayons gamma qui combinent la localisation dans l'espace et dans le temps. Les caméras gamma atteignent déjà un fort pouvoir de résolution mais peuvent encore être améliorées.

On dispose en plus grandes quantités de radioisotopes de courte période, notamment d'émetteurs de positrons produits dans des cyclotrons, et la liste des produits radiopharmaceutiques fabriqués industriellement s'accroît. La tomographie pratiquée avec des émetteurs de positrons utilisant les rayonnements gamma d'annihilation constitue une innovation extrêmement importante.

Par ailleurs, le radioimmunodosage est l'une des méthodes appliquées avec le plus de succès en médecine clinique et en recherche biomédicale. Elle a un caractère extrêmement spécifique, du moins si on applique des techniques à double anticorps. Sa sensibilité est maintenant de l'ordre du picogramme. Son degré d'exactitude varie de ± 10% à ± 2%, mais il est certainement possible de l'augmenter, en recourant, de préférence, à la préparation automatique des échantillons. On a déjà mis au point plus de 80 types de radioimmunodosage, et leur nombre ira à coup sûr grandissant. Une centaine de millions de radioimmunodosages ont été pratiqués dans le monde entier en 1975 et on estime que leur nombre devrait atteindre 250 millions en 1980.

Jusqu'à présent, la surveillance de la concentration de certains éléments dans des échantillons prélevés sur l'organisme humain servait essentiellement à étudier les carences d'origine alimentaire. On s'avise de plus en plus que la mesure des éléments contenus dans ces échantillons a également une grande valeur diagnostique pour le dépistage à grande échelle des maladies transmissibles et autres. Cette constatation est appelée à déboucher sur des études modèles menées au moyen d'isotopes radioactifs et,mieux encore,d'isotopes stables, ainsi que sur le recours généralisé, en médecine, à l'analyse par activation nucléaire et aux techniques de fluorescence X avec dispersion d'énergie.

APPLICATIONS INDUSTRIELLES

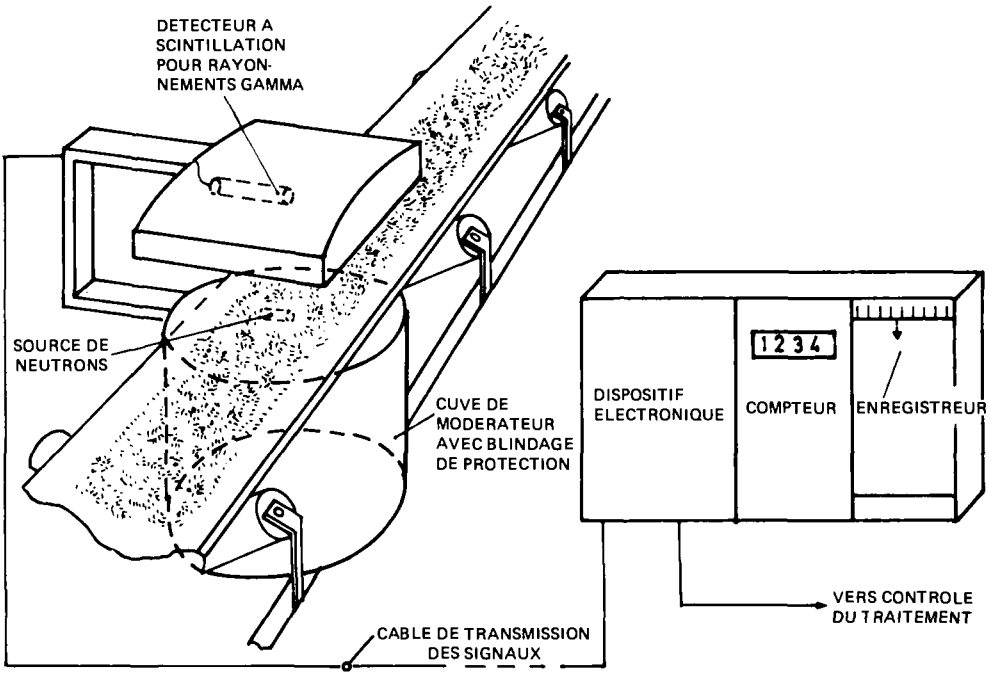
On a fréquemment eu recours aux indicateurs pour étudier et contrôler des processus industriels, par exemple, dans le transport du pétrole ou pour mesurer l'usure, mais à un degré moindre que pour les systèmes biologiques. Les processus industriels, moins compliqués, se prêtent plus fréquemment à l'emploi de méthodes classiques.

On prévoit cependant que l'emploi de jauges et d'autres méthodes d'analyse par rayonnement se développera. Dans l'industrie pétrolière, on attend beaucoup de la détermination quantitative de la saturation en hydrocarbures par l'emploi de diagrammes de capture de neutrons pulsés et de diagrammes établis d'après la mesure des rayons gamma résultant de la diffusion inélastique de neutrons. En combinant ces techniques et l'emploi d'un densimètre, on peut détecter les hydrocarbures jusqu'à une dizaine de mètres du trou de sonde.

La mise au point d'instruments portatifs dotés de sources d'isotopes et de détecteurs Si(Li) à fort pouvoir de résolution rendrait grand service en prospection minière et dans les industries extractives. De tels instruments permettront de pratiquer sur le terrain, à l'occasion d'études géochimiques, des analyses simultanées de plusieurs éléments dans des échantillons de sols et de sédiments fluviatiles.

En ce qui concerne l'emploi des jauges nucléaires dans le traitement industriel des minéraux, la mise au point de dispositifs de mesure continue, sur le convoyeur en mouvement, de la densité, du flux, de l'état hygrométrique et de la concentration d'éléments, marque une orientation importante. Le matériel mis au point pour les mesures statiques a déjà été tant soit peu adapté mais pourrait pour les mesures en cours de marche être encore considérablement amélioré. Il en est de même des techniques nucléaires employées pour déterminer de façon continue la répartition par taille des particules dans un processus industriel.

Dans les études fondamentales sur la dynamique des traitements, les techniques des indicateurs pourraient jouer un rôle de plus en plus grand, particulièrement pour optimiser l'exploitation des minerais à faible teneur.



La mesure des rayons gamma induits par la capture de neutrons permet de déterminer sur le convoyeur même la teneur en fer des concentrés de minerais.

Les rayonnements ionisants peuvent produire la réticulation et le greffage dans le plastique et le caoutchouc. Il est à prévoir que ces procédés, qui économisent l'énergie, recevront une attention accrue. Dans l'industrie de la cellulose, des textiles nous seront bientôt proposés qui freinent la propagation du feu, ainsi que de nouveaux types d'agents de conservation du bois rendus non lixiviables au moyen de rayonnements gamma ou de rayonnements d'électrons.

Nous avons mentionné déjà la stérilisation par irradiation des eaux usées municipales qui permet leur évacuation sans danger et éventuellement leur emploi en agriculture. On essaie actuellement d'adapter à la conservation des objets d'art et documents anciens cette technique basée sur une combinaison radioinduite de bois et de plastique.

HYDROLOGIE ET SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT

Les mesures au moyen d'isotopes naturels (carbone 14, hydrogène 3) et des rapports isotopiques ($^{2}H/^{1}H$, $^{18}O/^{16}O$) ont probablement atteint le degré suprême de raffinement dans leur application à la résolution de problèmes d'évaluation des ressources hydrologiques. Il est probable que ces méthodes seront de plus en plus employées au fur et à mesure que des groupes plus nombreux de pays en développement acquerront les moyens de pratiquer les analyses nécessaires et d'appliquer ces techniques.

De plus, les applications combinées de mesures faites avec des isotopes du milieu et de mesures chimiques sont appelées à se développer particulièrement dans l'étude des mécanismes de salinisation des eaux ainsi que des problèmes de pollution, lesquels conduiront sans aucun doute à un emploi accru des mesures de soufre 34 et d'azote 15.

Le problème mondial de l'énergie a été une incitation à réévaluer le potentiel des sources d'énergie géothermique. Les isotopes du milieu servent à l'étude hydrologique des systèmes géothermiques, par exemple à l'évaluation des zones de recharge, à l'étude des phénomènes de mélange de différents fluides et des temps de mélange. L'estimation de la température du réservoir est un paramètre fondamental que l'on déterminera probablement de plus en plus au moyen de géothermomètres isotopiques.

L'emploi d'indicateurs activables va peut-être favoriser le recours aux isotopes artificiels dans les mesures des eaux de surface ainsi que dans les techniques de sondage (pour déterminer la vitesse des eaux souterraines). Ces indicateurs ne sont pas nuisibles au milieu et peuvent servir dans des expériences de grande envergure sur le terrain. Une nouvelle technique qui pourrait être particulièrement utile dans l'étude des sédiments consiste à associer de faibles quantités de radioindicateurs, destinées à une première évaluation qualitative, à de plus grandes quantités d'un indicateur activable avec lequel il est procédé à une évaluation quantitative à long terme.

Il est difficile d'imaginer que l'on puisse protéger et surveiller le milieu sans les méthodes nucléaires. L'analyse par activation nucléaire et les techniques de fluorescence X avec dispersion d'énergie permettent de déceler rapidement plus de 30 éléments importants pour la lutte contre la pollution. Puisqu'on dispose d'une capacité non utilisée de réacteurs de recherche et d'accélérateurs dans de nombreux centres nucléaires, il serait possible et souhaitable de lancer un programme mondial de mesures de cette nature.

On peut aisément surveiller la propagation des agents polluants gazeux et sous forme d'aérosols au moyen de combinaisons d'isotopes stables spéciaux ou d'indicateurs activables. Aux Etats-Unis, on a fait une vaste expérience avec du méthane $^{13}C_2H_4$, qui se déplace facilement dans l'air et peut être détecté par spectrométrie de masse spéciale. Il a été possible de déceler sa présence à des distances de plus de 1600 kilomètres.

Il est possible d'introduire par réaction pyrotechnique des aérosols marqués ou dysprosium, et facile de les répartir localement dans l'atmosphère pour étudier le comportement de la pollution dans différentes conditions climatiques. La pollution par les gaz et poussières que rejettent les usines peut également être surveillée grâce à des indicateurs activables.

CONCLUSION

On peut, en extrapolant, décrire les perspectives qui se dessinent. Bien que les tendances examinées ici puissent légèrement varier et que la liste des questions traitées soit incomplète, on doit reconnaître que les isotopes et les rayonnements trouvent un champ croissant d'application dans notre monde technique et qu'il faut s'attendre à des développements très importants.