

Article n°4 de la série:
"Que peut attendre l'homme des radioisotopes?"

Préservation de la qualité des aliments et de l'environnement

par F.P.W. Winteringham*

L'homme ne peut certainement rien attendre des radioisotopes.

A la question:

Que peut faire l'homme des radioisotopes?

Il y a deux réponses, détruire ou exploiter.

Les progrès retentissants des sciences appliquées depuis Hiroshima,
la nature manifeste de l'homme
et de la société contemporaine

(cf. les travaux de Robert Ardrey, Jacob Bronowski et du Club de Rome),
et une modeste extrapolation dans l'avenir
ne donnent malheureusement pas à penser que la probabilité
de la première réponse soit négligeable.

Dans sa déclaration
en séance plénière de

la Conférence Triennale du Conseil international des Femmes
(PLE/73/24) tenue à Paris en 1973,

ma défunte épouse, s'exprimait en ces termes:

"Je bénis l'occasion qui m'est donnée

de présenter brièvement quelques observations
sur l'Agence internationale de l'énergie atomique, qui fait partie
de la famille des Nations-Unies ...

et a été créée pour encourager

les applications pacifiques de l'énergie atomique.

N'oublions jamais les autres applications,
qui sont terrifiantes ...

En aucun cas nous ne devrions, nous les femmes,
ignorer ces possibilités sous prétexte

qu'elles apparaissent sur un fond technique.

La science et la technique appliquées à des fins égoïstes,
pourraient aujourd'hui

détériorer l'environnement et ses ressources pour des générations".

Nous voici dans l'année internationale de la femme
et la présente communication

est dédiée à la mémoire de mon épouse.

Elle porte sur les applications pacifiques des isotopes
pour la préservation de la qualité des aliments et de l'environnement
et complète le numéro 2 de cette série,

rédigé par M. Ralph Kniseley,

sur les applications médicales et biologiques.

* Chef de la Section des résidus chimiques et de la pollution, Division mixte FAO/AIEA de l'énergie atomique dans l'alimentation et l'agriculture.

DONNEES DE BASE

Les traces de contaminants chimiques artificiels constituent sans aucun doute une menace effrayante pour la qualité de l'environnement (et partant la santé des organismes vivants qui en dépendent et la qualité de leur alimentation). Effrayante en ce sens que les contaminants ne peuvent généralement être détectés et identifiés que par les techniques évoluées de la science moderne et que leurs effets peuvent être tardifs; mais les conséquences biologiques peuvent néanmoins être graves. La tragédie de Minamata et les problèmes mondiaux de l'eutrophisation en témoignent. En outre, les mécanismes en jeu "sont très complexes et échappent au profane. Il appartient donc tout particulièrement à l'homme de science d'étudier leur nature, leur ampleur et leur importance biologique et de présenter ses conclusions de manière impartiale". (Groupe d'experts FAO/AIEA, Vienne, 1970).

L'emploi des radioisotopes ou des isotopes stables pour marquer des atomes ou des molécules dans les aliments, l'environnement ou les organismes vivants représente probablement le plus grands progrès technique de la recherche biologique depuis la découverte du microscope par Leeuwenhoek au 17^{ème} siècle.

L'emploi des radioindicateurs n'est pas nouveau. Dès 1923 Hevesy étudiait l'absorption du plomb par les plantes au moyen de l'isotope naturel du plomb — le thorium B. Néanmoins, ce n'est qu'avec la construction du premier réacteur nucléaire, à Chicago en 1942, que l'on a commencé à disposer de radioisotopes artificiels en quantités suffisantes pour généraliser leur emploi comme indicateurs.

Les techniques à base de radioindicateurs constituent désormais un puissant instrument de recherche. Combinées avec les méthodes chromatographiques et d'autres méthodes de fractionnement, elles sont largement utilisées pour des études fondamentales sur le comportement, le cheminement et l'importance des résidus de pesticides (par exemple: insecticides, fongicides, herbicides), produits pharmaceutiques, détergers, produits chimiques et déchets industriels, etc... qui s'infiltrent à l'état de traces dans les aliments, l'environnement et les organismes vivants qu'ils contaminent. "Les questions du métabolisme intermédiaire et des mécanismes de détoxification se présentent sous un jour assez nouveau depuis l'apparition des méthodes à base de radioindicateurs ... Les études sur le métabolisme et le cheminement des pesticides effectuées à l'aide de radioindicateurs ne tendent plus à satisfaire une simple curiosité académique pour des produits déjà utilisés; au contraire, elles représentent généralement une étape nécessaire et critique dans la compréhension de la rémanence et de l'action d'un pesticide, étape préliminaire à son utilisation effective." (Casida, 1969)

L'emploi des isotopes stables comme indicateurs, indépendamment de la simple constatation de leur présence, a été effectivement rendu possible par H. C. Urey en 1931, lorsqu'il est parvenu à concentrer le deutérium (²H) et à l'utiliser comme indicateur, ainsi que par Hevesy, un peu plus tard.

Lorsqu'on dispose d'un instrument de recherche nouveau et puissant, il est tentant de construire un programme sur des problèmes qui s'adaptent à cet instrument. La valeur de cette méthode est discutable. Il ne fait néanmoins aucun doute que les techniques isotopiques *jointes à la qualité des installations qui leur sont presque invariablement associées* (normes sévères pour l'aménagement et la sécurité des laboratoires, l'entretien des appareils, les connaissances spécialisées, etc.) ont beaucoup contribué à nous faire comprendre le comportement et l'importance des contaminants chimiques et radioactifs et en fait à évaluer dans quelle mesure les systèmes écologiques de l'environnement eux-mêmes peuvent recevoir ces contaminants sans effets inadmissibles. En outre, on pourrait

faire valoir avec raison que cette compréhension mérite de recevoir une priorité plus élevée qu'à présent si les situations ou voies véritablement critiques doivent être identifiées et les programmes de "contrôle" élaborés de manière plus rationnelle. Par exemple, les résultats de recherches pertinentes sur l'action et l'importance biologique d'un pesticide et de ses résidus dans les conditions à réunir pour une lutte efficace contre les parasites indiquent nettement les limites dans lesquelles le pesticide peut être utilisé sans danger. Si ces limites étaient observées grâce à une éducation et à des directives au moment de l'application, ne serait-il pas possible d'éviter d'avoir à établir un appareil bureaucratique et des programmes de contrôle? Cette méthode est en fait appliquée efficacement en pharmacologie et en médecine. Lorsque les conditions d'utilisation sûre et efficace d'un nouveau médicament ont été établies, celui-ci est largement utilisé sans qu'il soit nécessaire de prélever des échantillons de tissus ou d'excrétions du malade, dans le cadre d'un quelconque programme de contrôle visant à déterminer les résidus.

METHODES ISOTOPIQUES DE "MARQUAGE" OU DE "CONTROLE RADIOLOGIQUE"

Il convient d'étudier deux sortes d'application des méthodes isotopiques: 1) les études au moyen d'"indicateurs" dans lesquelles un contaminant ou polluant, marqué à l'aide d'isotopes stables ou de radioisotopes, est ajouté au système pour étudier son comportement et son évolution physique et chimique dans des conditions expérimentales ou simulées; 2) les utilisations des isotopes comme instruments de contrôle radiologique pour étudier un cas de contamination ou d'exposition.

La première catégorie comprend l'utilisation classique des isotopes comme indicateurs et constitue de manière générale une application à la recherche en ce sens que le système à l'étude, aliment, milieu comme le sol ou l'eau, organisme vivant animal ou végétal, est exposé artificiellement au contaminant ou au polluant à des fins de recherche.

La deuxième catégorie comprend les techniques familières de la radioactivation et de l'analyse par dilution isotopique ainsi que des techniques moins bien connues: utilisation de substrats ou de réactifs marqués pour surveiller ou étudier des systèmes existants déjà contaminés ou exposés. Ces substrats et réactifs sont les équivalents pour l'environnement des radioisotopes utilisés pour le diagnostic et pour le dosage radio-immunologique en médecine moderne (voir dans le Bulletin de l'AIEA, volume 16, No 5, le deuxième article de cette série). Dans le contexte de la préservation de la qualité de l'environnement, leurs possibilités semblent avoir été relativement peu exploitées. Ces deux formes d'application à la recherche sur la qualité de l'environnement et des aliments et sur leur protection ont fait l'objet de publications de l'AIEA (dont la liste figure dans la bibliographie ci-jointe).

ETUDES A L'AIDE DE RADIOINDICATEURS

Il est maintenant possible de se procurer dans le commerce toute une gamme de contaminants ou de polluants marqués par les radioisotopes ^3H , ^{14}C , ^{35}S , ^{32}P , ^{131}I ou autres avec une radioactivité spécifique de 10 millicuries par gramme ou davantage. Ce sont notamment des médicaments, des pesticides, des solvants industriels, des engrais, des additifs alimentaires, des intermédiaires organiques, etc. De plus, on trouve dans la documentation scientifique la description des méthodes à utiliser pour préparer presque tous les produits chimiques organiques de synthèse pour l'agriculture, la médecine et l'industrie à partir de simples intermédiaires marqués disponibles sur le marché. Nombreux sont les grands fabricants des nouveaux produits agrochimiques et pharmaceutiques qui préparent couramment leurs produits sous forme marquée afin de déterminer les limites dans lesquelles ceux-ci peuvent être commercialisés et utilisés sans danger (voir fig. 2). De même, les radioisotopes de nombreux éléments "toxiques" peuvent être obtenus dans le commerce;

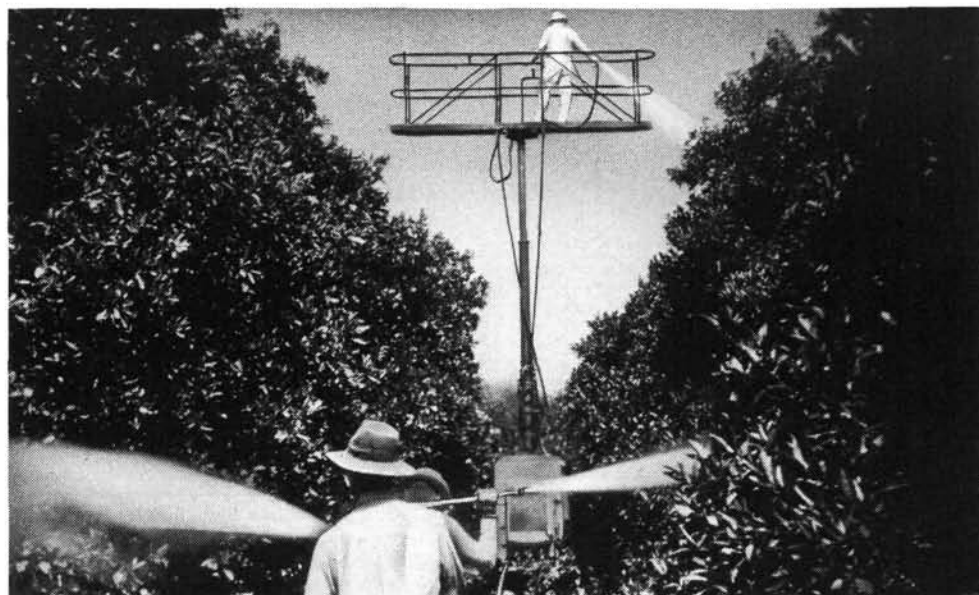


Figure 2: Quel est le sort final des insecticides pulvérisés dans la lutte contre les parasites des fruits? Les techniques isotopiques aident considérablement à répondre à ce genre de questions et à déterminer les conditions d'utilisation sans danger des pesticides.

c'est par exemple le cas de ^{76}As , $^{115\text{m}}\text{Cd}$, ^{51}Cr , ^{208}Pb (sous forme de radium D), ^{203}Hg , ^{75}Se , ^{65}Zn , etc.

Le principe commun aux études sur la rémanence et le cheminement consiste à préparer d'abord le pesticide, médicament ou contaminant ou polluant éventuel avec un marquage convenable. Le est alors appliqué dans des conditions expérimentales ou simulées d'exposition ou de contamination prévues. A divers intervalles, les échantillons (par exemple d'excrétions d'animaux, de sang, de tissus végétaux ou d'aliments traités, de sol, d'eau, etc ...) sont prélevés, soumis à des mesures de la radioactivité totale, extraits et fractionnés et les radio-activités des fractions sont aussi mesurées. La proportion de radioactivité mesurée et la fraction dans laquelle elle apparaît quantifient la substance, la caractérisent, et parfois l'identifient chimiquement, même s'il s'agit d'un produit de dégradation totalement différent de la substance originale. Il a ainsi été possible d'étudier le sort d'un résidu du DDT dans le blé depuis le moment de son application comme insecticide en passant par tous les stades, depuis la fabrication de la farine et du pain jusqu'à la consommation finale par des animaux d'expérience (dont l'auteur!). Le fractionnement des dérivés radioactifs de DDT récupérés à différents stades et leur lecture par radiochromatographie (voir fig.1) ont permis de suivre leurs cours jusqu'à l'excrétion "finale" sous forme de métabolite polaire non toxique dans l'urine humaine. Il existe maintenant sur ce sujet une abondante documentation indiquant la rémanence et le sort final d'une gamme étendue de résidus chimiques "étrangers" qui se glissent dans les aliments, l'environnement et les tissus vivants (cf. fig. 2).

Deux aspects importants ont été mis en lumière par les programmes mixtes de recherches coordonnées FAO/AIEA établis pour aider les hommes de science du "tiers monde" à identifier et étudier leurs problèmes dans les conditions qui leur sont propres. En premier lieu, les problèmes de contamination et de pollution sont souvent tout aussi graves mais plus négligés dans les pays "en voie de développement" que dans les pays avancés.

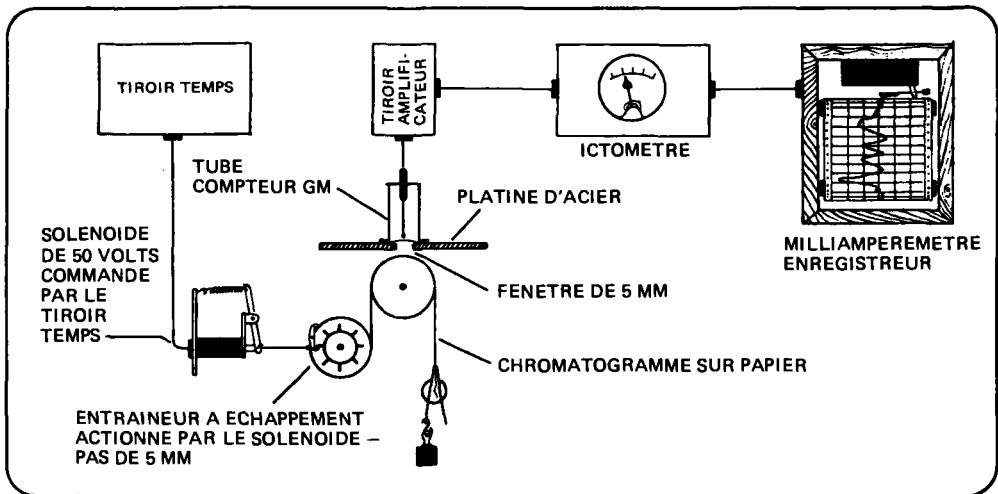


Figure 1: Lecteur de radiochromatographie sur papier mis au point par l'auteur il y a plus de 25 ans pour étudier le sort des contaminants présents à l'état de traces dans les denrées alimentaires et les tissus vivants. Des méthodes de ce genre, qui combinent la chromatographie et l'emploi des radioindicateurs, sont maintenant largement appliquées en laboratoire pour étudier le sort et la rémanence des médicaments, pesticides, détergers et autres contaminants et polluants éventuels.

Par exemple, là où une industrialisation rapide a supplanté les pêcheries traditionnelles près des estuaires des rivières mais où la recherche et la législation complexes, qui semblent normales dans les pays avancés, font défaut. En deuxième lieu, la nature des problèmes peut être tout à fait différente dans les conditions d'un pays en "voie de développement" de sorte que les données publiées existantes ne sont pas toujours applicables ou disponibles. C'est le cas, par exemple, de l'emploi des insecticides et fongicides pour la protection du cacao en Afrique Occidentale.

Outre qu'elle est extrêmement sensible et spécifique par rapport à la substance marquée, la technique des indicateurs isotopiques a une propriété qu'elle est seule à posséder à savoir que, dans toutes les applications pratiques, le produit marqué a des propriétés identiques à celles du composé ou de l'élément chimique normal non marqué et peut néanmoins être détecté et mesuré par le rayonnement qu'il émet. Ainsi, le comportement du DDT marqué peut être étudié lorsqu'on se trouve en présence d'une contamination existante qui, dans le cas du DDT, s'étend à toute la biosphère.

Autre avantage, dans de nombreux cas il est possible de constater la présence du composé marqué et de déterminer sa répartition par des techniques non destructives. Ainsi, la "bioaccumulation" par le poisson *in vivo* et la concentration dans un organe particulier d'un contaminant marqué du milieu aquatique peuvent être suivies par des méthodes de comptage et de scintigraphie à distance de l'organisme entier. La distribution d'un fongicide systémique marqué dans l'ensemble de la plante ou dans des sections histologiques peut être photographiée sous forme d'"autoradiographies" préparées simplement en plaçant une plaque ou une émulsion photographique en contact avec l'échantillon dans l'obscurité pendant le temps nécessaire. En fait, c'est grâce aux effets de la radioactivité (d'un sel d'uranium) sur une émulsion photographique dans l'obscurité que Henri Becquerel a découvert la radioactivité en 1896.

Les techniques isotopiques comme toutes les autres comportent des embûches et des limitations. Les embûches sont généralement liées à l'ignorance des propriétés nucléaires ou de la biochimie du système étudié. Les limitations sont dues surtout aux coûts

relativement élevés de la préparation de nombreux composés marqués, aux dangers réels ou imaginaires d'irradiation et au fait que de nombreux radioisotopes qui seraient utiles, ont des "périodes" trop courtes. Ainsi, le brome-82 radioactif perd la moitié de sa radioactivité en 35 heures. La durée des expériences avec ces isotopes doit généralement être limitée à 10 – 15 périodes. Ces délais sont beaucoup trop courts pour l'étude de nombreux problèmes de l'environnement.

C'est en particulier pour ces raisons qu'il est nécessaire d'organiser des cours sur l'emploi des techniques isotopiques pour l'étude des problèmes de la contamination des aliments et de l'environnement. Les radioisotopes sont de merveilleux instruments de travail, mais pour des raisons de sécurité et d'efficacité, on ne peut les utiliser sans préparation comme on le ferait d'un microscope.

INDICATEURS ISOTOPIQUES STABLES

Les limitations des radioindicateurs dues à la décroissance radioactive (courtes périodes de certains isotopes et risques éventuels d'irradiation) empêchent généralement de procéder à des expériences à grande échelle sur le terrain. En outre, il n'existe pas de radioisotopes d'au moins deux éléments importants dans ce contexte – l'azote et l'oxygène.

Le Colloque FAO/AIEA tenu à Vienne en novembre 1974 (Rapports isotopiques en tant qu'indicateurs des sources et du comportement de la pollution-compte-rendu d'un colloque de l'AIEA, Vienne, 1975, STI/PUB/382) a montré que des améliorations sensationnelles avaient été apportées à la production et à l'utilisation d'isotopes stables comme indicateurs. Ces améliorations ont des causes diverses: séparation plus efficace et plus économique des isotopes stables, en particulier ^{12}C , ^{13}C , ^{14}N , ^{15}N , ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O , et ^{34}S , sensibilité et disponibilité accrues des instruments de mesure et élargissement de la gamme des composés chimiques disponibles marqués par isotopes stables. Les éléments et leurs composés, marqués par modification du rapport des isotopes naturellement présents (par exemple, par appauvrissement en ^{14}N ou enrichissement en ^{15}N de l'azote naturel) existent maintenant sur le marché en quantités de l'ordre du kilogramme. Ces matières peuvent être utilisées sur le terrain sans risque d'irradiation ni limite de temps due à la décroissance radioactive. Les progrès de l'instrumentation et des méthodes ont mis leur emploi à la portée du budget des petits instituts. Il est maintenant possible d'obtenir des appareils satisfaisants pour la mesure des isotopes stables pour moins de 50 000 dollars.

Avec l'utilisation des spectromètres de masse modernes et de la résonance magnétique nucléaire (RMN), non seulement la spectroscopie permet de mesurer le rapport isotopique, mais elle indique aussi l'emplacement de l'isotope et la structure moléculaire; l'utilisation des techniques de "marquage multiple" permet de détecter les molécules marquées pour des conditions de dilution dans l'environnement comparables à celles du marquage par un seul radioindicateur. Ainsi la probabilité de formation, dans son état normal de synthèse, de l'herbicide 2,4,5-T marqué uniformément avec ^{13}C est inférieure à un sur 10^{15} . L'utilisation de l'herbicide ainsi marqué artificiellement permettrait donc de le détecter à coup sûr après une dilution considérable.

L'utilisation des indicateurs isotopiques stables dans la recherche sur l'environnement offre manifestement de grandes possibilités. Dans ce contexte, on pourrait signaler le programme mixte FAO/AIEA/GSF pour l'étude des résidus des engrais azotés. Ce programme qui vient d'être considérablement élargi grâce à la générosité de la République fédérale d'Allemagne, repose sur des recherches internationales coordonnées utilisant des engrais marqués au ^{15}N pour étudier le comportement du résidu azoté des engrais, c'est à dire de la partie (parfois plus de la moitié) qui n'est pas absorbée par la plante. Incidemment, ces engrais, qui sont un apport essentiel pour l'agriculture, coûtent de plus en plus cher, en particulier aux pays en voie de développement. Quelle est la quantité de

résidu qui retourne à l'atmosphère par des processus de "dénitrification" du sol et quelle est la quantité qui est entraînée par lessivage dans les eaux locales souterraines, superficielles ou même potables? On a déjà prouvé que les concentrations du nitrate inorganique ont augmenté sensiblement dans certaines eaux souterraines et superficielles et que dans certains cas elles dépassent en fait les limites recommandées par l'OMS pour les eaux potables. Le nouveau programme porte spécialement sur ces questions et il est certain que les réponses ont un grand intérêt du point de vue de l'environnement et de l'économie.

D'autres problèmes de l'environnement, où l'utilisation des indicateurs isotopiques se révèle déjà précieuse, concernent le sort et le comportement des émissions de soufre et d'azote industriels dans l'atmosphère. On sait maintenant que celles-ci peuvent modifier et modifient effectivement le pH ou l'acidité des eaux de pluie dans de vastes secteurs et qu'elles affectent la santé des plantes et les propriétés du sol.

De vastes problèmes de même nature se posent au sujet du comportement de l'azote dans la pollution et l'entrophisation des masses d'eau intérieures. On sait par exemple que dans certains systèmes aquatiques on peut remédier à des concentrations indésirables de nitrate par des processus naturels et peut-être par stimulation artificielle des processus biologiques de dénitrification. Des questions comme celles-ci ne peuvent être résolues que par des expériences à grande échelle sur le terrain et il est maintenant possible de les étudier avec les isotopes stables de l'azote.

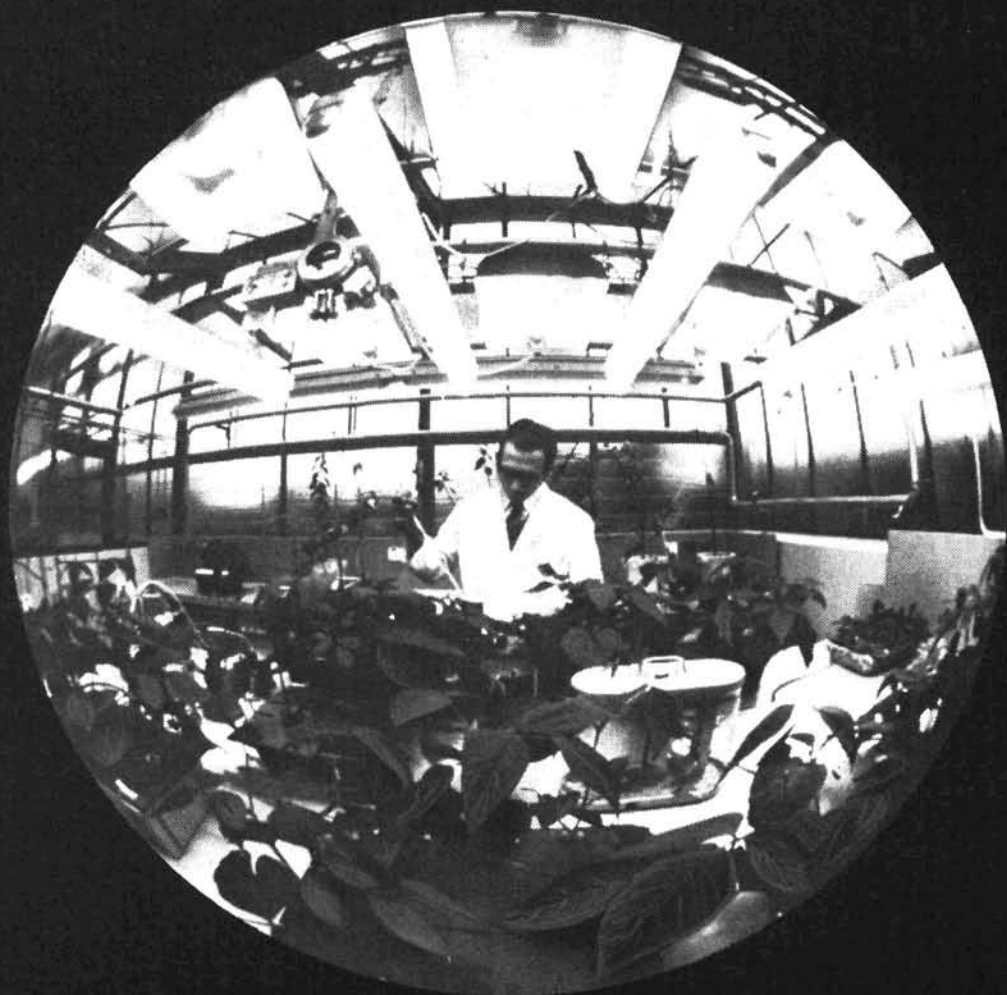
LES INDICATEURS ISOTOPIQUES EN TANT QU'INSTRUMENTS DE "SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE"

L'"industrie nucléaire", les essais d'explosifs nucléaires, la production nucléo-énergétique et le traitement du combustible ont entraîné l'apparition dans le monde entier de substances radioactives qui, à l'état de traces contaminent les aliments, le milieu et les organismes vivants; mais on notera qu'à l'heure actuelle la radioactivité de ces substances est très inférieure à celle qui est due au rayonnement naturel auquel l'homme a été et sera toujours exposé.

Radioécologie

L'instrumentation et la méthodologie utilisées dans la recherche au moyen de radio-indicateurs peuvent naturellement servir à surveiller la radioactivité ambiante. Les données ainsi obtenues ont fourni des renseignements exceptionnels sur le comportement et la rémanence des contaminants dans l'environnement atmosphérique, terrestre et aquatique. Elles montrent, par exemple, que la dilution effective de certains contaminants à l'état de traces absorbés par les océans est loin d'être aussi importante qu'on pourrait le supposer en considérant les volumes totaux des océans, et que seules les couches superficielles relativement peu profondes (30 mètres) servent d'égout.

A la différence d'un grand nombre des problèmes de contamination chimique, ceux de la contamination radioactive étaient prévus dès le début de l'ère de l'"énergie atomique". Les études qu'ils ont suscitées ont abouti à la mise au point de normes strictes, de limites pratiques dérivées, etc. pour la protection de l'homme et de l'environnement. La sensibilité et la précision considérables avec lesquelles il a été possible d'étudier les contaminants radioactifs (à des concentrations beaucoup plus faibles que celles qui pouvaient être déterminées par l'analyse chimique classique) ont fourni des données abondantes, non seulement sur le comportement des contaminants radioactifs, mais sur celui des contaminants non radioactifs à l'état de traces. Dans le présent contexte, on peut dire que ce domaine de la "radioécologie" et les normes de radioprotection qui lui sont



"Les études sur le métabolisme et le cheminement des pesticides effectuées à l'aide de radioindicateurs ... représentent ... une étape nécessaire et critique dans la compréhension de la rémanence et de l'action d'un pesticide, étape préliminaire à son utilisation effective." La photo montre une serre de l'Institut de botanique et de microbiologie du Centre d'études nucléaires de Juliers (République fédérale d'Allemagne).
Photo: KFA, Jülich

associées ont fourni une contribution importante à la solution des problèmes de préservation de la santé humaine et de la qualité de l'environnement en dépit des contaminants non radioactifs aussi bien que radioactifs.

Analyse par radioactivation

Le développement de l'industrie nucléo-énergétique a eu, entre autres, pour résultat de faire proliférer les sources de neutrons, de particules accélérées et de rayonnements et de les rendre accessibles aux hommes de science d'un grand nombre de pays. De nombreux éléments peuvent être déterminés avec une grande précision par irradiation à l'aide de ces sources. Cette irradiation provoque l'excitation de ces éléments (c'est le cas de l'analyse par fluorescence gamma et X) ou la formation d'un radioisotope qui peut alors être détecté, déterminé et identifié. La plus importante et la plus largement utilisée de ces techniques est celle de l'analyse par activation neutronique. Ces techniques d'analyse par activation de photons et de particules ont maintenant leur place dans la méthodologie de l'analyse d'éléments multiples. Ainsi, des éléments qui pourraient être toxiques comme le manganèse, le vanadium, le bismuth, le cuivre, le cadmium, l'arsenic, le mercure ou le zinc peuvent être détectés à des concentrations qui ne dépassent pas un sur 10^{16} . Certains laboratoires avancés ayant accès aux flux de neutrons intenses des réacteurs nucléaires ont poussé très loin l'automatisation de l'analyse par activation neutronique et l'appliquent couramment aux aliments et aux milieux de l'environnement.

Substrats et réactifs radiomarqués

C'est dans ce domaine que les possibilités paraissent particulièrement intéressantes dans le contexte de l'environnement. C'est ici aussi que les applications ont marqué le pas derrière celles de la médecine nucléaire. Quelques brefs exemples suivent:

Certains contaminants de l'environnement à l'état de traces ont un effet secondaire indésirable, à savoir leur action sur le matériel génétique des cellules vivantes, et on a de bonnes raisons de penser que cette action explique les propriétés carcinogènes de certains produits chimiques. Au cours de leur évolution, les cellules ont acquis des mécanismes de défense pour se débarrasser des parties endommagées du matériel génétique. Ces mécanismes sont ceux de restauration de l'ADN (acide déoxyribonucléique – constituant chimique du noyau de la cellule qui régit la croissance et la reproduction). Les produits chimiques qui empêchent la restauration de l'ADN sont les co-carcinogènes. Il est maintenant possible de dépister les inhibiteurs éventuels de la restauration de l'ADN en étudiant leurs effets sur l'incorporation en laboratoire de la thymidine radioactive (précurseur de l'ADN) à des préparations de l'ADN des cellules. Ces techniques représentent un progrès important dans la recherche essentielle des propriétés mutagènes des carcinogènes et des co-carcinogènes éventuels.

Un grand nombre de contaminants indésirables de l'environnement et de substances toxiques portent préjudice à l'organisme des animaux ou végétaux vivants par l'inhibition d'enzymes vitales (catalyseurs biologiques). L'inhibition d'une enzyme se traduit invariablement par une diminution de son pouvoir de transformation de son "substrat" chimique normal. Heureusement, pour certaines enzymes, l'inhibition est mesurable alors que les concentrations des contaminants sont très inférieures à celles qui provoquent des symptômes d'intoxication. Dans de nombreux cas, on peut augmenter la sensibilité de ces mesures en utilisant un substrat radioactif pour mesurer l'activité de l'enzyme. Il est ainsi possible de détecter l'exposition de l'homme à certains insecticides toxiques bien avant que ceux-ci ne puissent avoir d'effets importants sur sa santé. On a mis au point et appliqué des méthodes faisant appel à l'acétylcholine marquée au carbone¹⁴ comme substrat d'indicateur pour déterminer l'activité de la cholinestérase dans des échantillons de sang humain prélevés au doigt pour déceler la vulnérabilité du bétail et gibier aux insecticides au



Figure 3: A la surface, les eaux sont tranquilles, mais en profondeur les poissons meurent. Les techniques des substrats marqués peuvent indiquer des modifications critiques dans les niveaux microbiologiques essentiels des chaînes alimentaires aquatiques.

carbamate ou organophosphorés utilisés dans le cadre d'un essai de lutte contre les sauterelles. On étudie aussi son emploi pour déceler la vulnérabilité du bétail aux acaricides marqués au carbamate ou organophosphorés utilisés pour la lutte contre la tique du bétail. Cette méthode radiométrique est probablement la plus sensible qui soit pour détecter les effets sous-cliniques de nombreux résidus d'insecticides dans l'environnement.

Une application importante de la technique des substrats marqués est celle qui consiste à utiliser des substrats simples comme le bicarbonate marqué au carbone¹⁴ ou le phosphate marqué au phosphore 32 comme indicateurs de l'activité des algues et microbes dans des échantillons d'eau. L'eutrophisation d'un lac, par exemple, dépend de ce "niveau trophique primaire" de la capacité du phytoplancton à utiliser des constituants minéraux dans sa croissance et sa production par photosynthèse. Cette utilisation est stimulée par l'augmentation des concentrations d'azote et de phosphore due à la contamination et peut déclencher toute la chaîne d'événements biologiques qui mène à l'eutrophisation et à la réduction des populations utiles de poissons (cf. fig.3). Ces techniques ont été largement étudiées et un Groupe consultatif mixte FAO/AIEA qui s'est réuni récemment a recommandé de les utiliser de manière coordonnée pour révéler les modifications indésirables qui se produisent dans les lacs, réservoirs, etc.

Dans la technique dite du "pool marqué", on peut marquer les intermédiaires métaboliques des tissus d'un animal ou d'un végétal vivants en apportant à l'organisme un précurseur radioactif bien choisi. Les intermédiaires du "pool marqué" qui en résultent, peuvent être décomposés facilement (par les techniques de chromatographie, par exemple) et identifiés dans de très petits échantillons de tissus; on étudie ensuite les effets de la contamination ou des poisons de l'environnement sur les voies métaboliques. Cette application sert à analyser les effets de l'anhydride sulfureux de l'atmosphère sur les plantes sensibles. A l'origine, l'auteur a mis au point cette technique pour étudier les effets des poisons sur des insectes vivants et il a été possible de déceler ces effets dans des fractions de tissu équivalentes à un centième du cerveau d'une mouche domestique.

Radioimmunos dosage des résidus chimiques

L'apparition d'une protéine étrangère (antigène) dans les tissus d'un animal vivant peut stimuler la production, par une réaction de défense, d'une protéine spécifique, dite

anticorps. Le sérum sanguin qui contient un tel anticorps longtemps encore après la stimulation initiale a la propriété de pouvoir se combiner *in vivo* ou *in vitro* avec l'antigène. Cette technique est en fait la base biochimique de l'immunisation par vaccination.

En combinant chimiquement l'antigène avec un contaminant à l'état de traces (par exemple, l'insecticide parathion) on peut lui faire produire un anticorps qui est spécifique de l'insecticide. Ainsi, si à l'incubateur l'"anti-sérum" obtenu sur un animal traité spécialement est incubé avec une concentration connue du contaminant radioactif, mais une concentration inconnue du même contaminant non radioactif, il est possible d'isoler le complexe anticorps-insecticide et de mesurer la proportion d'insecticide marqué récupérée sous cette forme. Cette proportion dépendra de la concentration inconnue du résidu chimique concurrent mais non marqué et l'on aura ainsi une méthode d'analyse très spécifique. Cette méthode de "radioimmunos dosage" des résidus chimiques semble aussi devoir fournir des données sur les effets secondaires des contaminants à l'état de traces qui entraînent des réactions immunologiques, telles que les allergies. Il est aussi possible que ces réactions jouent un rôle dans le grave problème de la résistance des parasites à certains pesticides, dont les mécanismes demeurent souvent inconnus.

Rapports isotopiques dans l'environnement

La mesure exacte des rapports entre les isotopes stables et les radioisotopes contenus dans les contaminants actuels de l'environnement peut parfois fournir des informations non seulement sur les degrés de contamination mais sur l'emplacement et la nature de la source. Ainsi, la mesure des rapports du krypton 85 et du tritium dans l'environnement a constitué un moyen d'obtenir des indications quantitatives sur la fission nucléaire et les essais nucléaires dans l'atmosphère à l'échelle mondiale et sur leur contribution respective. La mesure des rapports $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ naturels de l'azote du sol devrait fournir des indications sur la quantité d'azote du sol qui a pu se perdre par dénitrification et non par lessivage.

CONCLUSION

Il n'a été possible de présenter que très succinctement l'état et les possibilités actuelles des techniques isotopiques destinées à faciliter la préservation de la qualité des aliments et de l'environnement et la recherche dans ce domaine. Néanmoins, il se peut que ces applications, avec celles de la médecine nucléaire, contribuent davantage à la santé et au bien-être de l'homme que le développement de l'énergie d'origine nucléaire.

NOTE

Les vues exprimées dans le présent article n'engagent que l'auteur et ne sont pas forcément celles des organisations des Nations Unies mentionnées.

Bibliographie

Publications de l'AIEA et d'organisations connexes sur l'emploi des techniques isotopiques pour la préservation de la qualité des aliments et de l'environnement et sur la recherche dans ce domaine.

AIEA	Reference Methods for Marine Radioactivity Studies	Collection "Rapports techniques" N° 118	AIEA, Vienne, 1970 STI/DOC/10/118
AIEA	Application de techniques nucléaires à la mesure et au contrôle de la pollution du milieu	Compte rendu d'un colloque, Salzbourg, 26-30 octobre 1970	AIEA, Vienne, 1971 STI/PUB/268

AIEA	Méthodes d'activation nucléaire dans les sciences biologiques	Compte rendu d'un colloque, Bled, 10-14 avril 1974	AIEA, Vienne, 1972 STI/PUB/310
AIEA	Contamination radioactive du milieu marin	Compte rendu d'un colloque, Seattle, 10-14 juillet 1972	AIEA, Vienne, 1973 STI/PUB/313
AIEA	Laboratory Manual on the Use of Radiotracer techniques in Industry and Environmental Pollution	Collection "Rapports techniques" n° 161	AIEA, Vienne, 1975 STI/DOC/10/161 IS BN 92-0-165075-2
FAO/AIEA	Méthodes nucléaires pour la recherche sur les résidus de pesticides	Compte rendu d'un groupe d'étude, Vienne, 16-20 décembre 1968	AIEA, Vienne, 1970 STI/PUB/252
FAO/AIEA	Nitrogen-15 in Soil-Plant Studies	Compte rendu d'une réunion de coordination de la recherche, Sofia, 1-5 décembre 1969	AIEA, Vienne, 1971 STI/PUB/278
FAO/AIEA	Pesticides Residues and Radioactive Substances in Food: A comparative Study of the Problems	Rapport d'un groupe d'experts, Vienne, 12-16 octobre 1970	AIEA, Vienne, 1972 AIEA-144
FAO/AIEA	Etudes, à l'aide de radioindicateurs, des résidus chimiques dans les aliments et l'agriculture	Compte rendu conjoint d'un groupe d'étude et d'une réunion de coordination de la recherche, Vienne, 25-29 octobre 1971	AIEA, Vienne, 1972 STI/PUB/332
FAO/AIEA	Isotope Tracer Studies of Chemical Residues in Food and the Agricultural Environment	Comptes rendus et rapport de réunions de coordination de la recherche, Ispra, 30 octobre-10 novembre 1972	AIEA, Vienne, 1974 STI/PUB/363
FAO/AIEA	Effects of Agricultural Production on Nitrates in Food and Water with Particular Reference to Isotope Studies	Comptes rendus et rapport d'un groupe d'experts, Vienne, 4-8 juin 1973	AIEA, Vienne, 1974 STI/PUB/361
FAO/AIEA	Radiolabelled Substrates for Studying Biological Effects of Trace Contaminants	Rapport d'une réunion de coordination de la recherche, Vienne, 8-11 octobre 1974	AIEA, Vienne, 1975 AIEA-170
FAO/AIEA	Rapports isotopiques en tant qu'indicateurs des sources et du comportement de la pollution	Compte rendu d'un colloque, Vienne, 18-22 novembre 1974	AIEA, Vienne, 1975 STI/PUB/382 ISBN-92-0-010375-8
FAO/AIEA/ OMS	Méthodes d'analyse radiochimique	Collection "Rapports techniques" OMS, 1959, 173	OMS, Genève, 1966
FAO/AIEA/ OMS	Etude comparative de la contamination des aliments et de l'environnement	Compte rendu d'un colloque, Otaniemi, 27-31 août 1973	AIEA, Vienne, 1974 STI/PUB/348
FAO/AIEA/ OIT/OMS	Mercury Contamination in Man and his Environment	Collection "Rapports techniques" N° 137	AIEA, Vienne, 1972 STI/DOC/10/137