

a-t-il examiné quelques-uns des problèmes qui peuvent se poser pendant le transport.

Une autre question importante est celle du coût des diverses méthodes de gestion des déchets. J.J. Perona, R.L. Bradshaw, J.T. Roberts et J.O. Blomeke (Etats-Unis) ont évalué les aspects économiques du stockage en réservoir, de la calcination en pot et du transport des déchets radioactifs provenant du traitement du combustible irradié dans les réacteurs de puissance.

Au cours de ses observations sur le coût de la gestion des déchets, W.G. Belter a déclaré dans son étude d'ensemble : "On n'a pas encore établi quelle fraction du prix de revient de l'énergie d'origine nucléaire doit être imputée à l'élimination des déchets et on ne dispose d'aucune évaluation effective du coût des méthodes d'élimination définitive. Cependant, le coût du stockage en réservoirs du type actuellement utilisé - qui comporte une "sur-

veillance perpétuelle" - varie selon les estimations entre 0,1 et 0,15 mill/kWh. Ce coût ne représente approximativement que 1 à 2 % du prix de revient de l'énergie d'origine nucléaire, celui-ci étant évalué à 8 ou 10 mills/kWh. Les études techniques et économiques qui ont été faites au Laboratoire national de Oak Ridge montrent que le coût total du stockage provisoire des déchets liquides, de leur calcination en pot et de leur transport sur une distance globale de 5 000 km peut être ramené à 0,02 mill/kWh(e). Le coût approximatif de l'évacuation dans des formations salines de grandes quantités de déchets solides calcinés est évalué à 0,01 mill/kWh(e). En tenant compte des données déjà obtenues au cours d'expériences de laboratoire et d'essais techniques sur des matières non radioactives ainsi que des renseignements provisoires fournis par les programmes de démonstration et d'essais qui portent sur des déchets de haute activité, on peut affirmer que les opérations de gestion des déchets ne devraient pas constituer un obstacle majeur à la production d'énergie d'origine nucléaire dans des conditions concurrentielles."

APPLICATIONS MEDICALES DU RADIOCALCIUM

APERCU D'UN PROGRAMME DE L'AIEA VISANT A PROMOUVOIR LES APPLICATIONS DU CALCIUM-47

Le calcium remplit plusieurs fonctions biologiques essentielles qui sont étudiées depuis longtemps par les différentes méthodes dont dispose la science médicale. L'une des plus importantes de ces méthodes est l'analyse au moyen de radioindicateurs, qui permet de déterminer les fonctions du calcium au sein de l'organisme à l'aide d'un radioisotope de cet élément.

Le programme d'application du calcium-47 établi par l'Agence internationale de l'énergie atomique est destiné à promouvoir ces recherches en facilitant la production et l'emploi de ce radioélément. L'importance du calcium-47 s'explique par des propriétés particulières qui en font l'instrument le plus précieux pour un grand nombre de recherches sur le calcium à l'aide de radioindicateurs.

A l'état naturel, le calcium est un élément stable que l'on trouve sous la forme de six isotopes. Le plus commun de ces six isotopes stables est le calcium-40, qui représente environ 97 % du calcium naturel. Les autres isotopes stables se trouvent dans des proportions très faibles; ainsi, le calcium-46, qui revêt un intérêt particulier pour la production du calcium-47, ne représente que 0,003 % du calcium naturel.

Avantages du calcium-47 et méthodes de production

Outre les isotopes stables, on est parvenu à produire six radioisotopes artificiels du calcium, dont trois possèdent des propriétés qui permettent de les utiliser comme radioindicateurs. Le plus important est le calcium-45 qui a été largement employé au cours des 15 dernières années. On a également eu recours au calcium-49. Cependant, pour de nombreux travaux, c'est le calcium-47 qui est le plus utile. Une comparaison des caractéristiques physiques de ces trois radioéléments fera comprendre pourquoi.

Le calcium-45, qui a une période d'environ 160 jours, émet un rayonnement bêta de faible énergie qui est complètement absorbé par une couche de matière d'une épaisseur inférieure à 1 mm. Dans la plupart des études sur l'organisme humain, la période relativement longue de ce radioisotope entraîne une irradiation excessive du sujet; aussi considère-t-on son absorption comme dangereuse. En outre, le faible niveau d'énergie de son rayonnement rend souvent les mesures difficiles. En revanche, la période du calcium-49 n'est que de neuf minutes; elle est trop courte pour permettre de l'utiliser comme radioindicateur, mais peut présenter des avantages par ailleurs.

Le calcium-47 a une période d'environ 20 jours, c'est-à-dire suffisamment longue pour les besoins de nombreuses recherches biologiques et assez courte pour que la personne examinée ne soit pas soumise à une irradiation prolongée. Il émet des rayons bêta et des rayons gamma; comme ces derniers peuvent traverser plusieurs centimètres de tissus, la détermination du calcium-47 dans l'organisme est possible par des mesures externes. En outre, la mesure de la teneur en calcium-47 est infiniment plus facile que celle de la teneur en calcium-45, même lorsqu'il s'agit d'échantillons isolés tels que quelques millimètres cubes de sang. Ainsi, le calcium-47 possède des propriétés particulières qui permettent de l'utiliser dans les recherches biologiques lorsque le calcium-45 ne saurait être employé; quelques-unes de ces applications revêtent une importance médicale considérable.

Malheureusement, le calcium-47 est difficile à produire. Certes, l'irradiation du calcium ordinaire dans un réacteur provoque la capture de quelques neutrons par le calcium-46, qui se transforme ainsi en calcium-47. Cependant, comme le calcium-46 est extrêmement rare, la quantité de calcium-47 produite par ce procédé est insignifiante par rapport à la quantité de calcium-45 que l'on obtient à partir du calcium-44, qui est un isotope stable plus abondant. Il existe plusieurs autres méthodes pour obtenir du calcium-47, mais elles sont toutes fort onéreuses. A l'heure actuelle, la solution la plus économique consiste à utiliser un procédé à deux phases: tout d'abord, le calcium-46 est séparé des autres isotopes naturels à l'aide d'appareils de séparation isotopique; le calcium-46 presque pur ainsi obtenu est ensuite irradié dans un réacteur pour donner du calcium-47 présentant un degré de pureté identique. Cependant, il ne faut pas perdre de vue qu'il y a très peu de centres dans le monde qui possèdent des appareils de séparation isotopique.

Importance des recherches sur le calcium

Il serait peut-être utile d'examiner maintenant pour quelles raisons la production de radioindicateurs destinés aux recherches sur le calcium revêt un intérêt particulier. L'explication est fournie par l'importance physiologique du calcium, qui constitue l'élément essentiel du squelette; en effet, ce dernier contient plus de 99 % du calcium de l'organisme entier. Ce qui est moins bien connu, c'est le fait que cet élément remplit d'autres fonctions physiologiques primordiales. Un échange continu et rapide de calcium s'opère entre le sang et les tissus mous d'une part, et les réserves accumulées dans le squelette d'autre part.

Avant l'apparition des radioindicateurs, il était pratiquement impossible d'étudier les diverses voies du métabolisme du calcium dans l'organisme: passage dans le sang à travers les parois de l'intestin; fixation dans le squelette, retour dans le sang et in-

corporation éventuelle aux molécules complexes, et enfin élimination. Toutes ces voies sont influencées par les maladies et les régimes alimentaires, tandis que les perturbations du métabolisme peuvent à leur tour causer des maladies. La détermination des voies du métabolisme et l'identification des troubles dont elles peuvent être le siège ne deviennent possibles que si le chercheur est à même d'administrer un "traceur" dans des conditions chimiques ou physiologiques appropriées à cette étude. Les radioisotopes du calcium sont particulièrement indiqués pour jouer ce rôle.

Une application quelque peu différente du calcium-47 est la détection et la localisation des tumeurs osseuses, pour lesquelles on ne peut employer aucun autre isotope du calcium. Qu'il s'agisse d'un cancer primaire du squelette ou de métastases d'un cancer de tissus mous, ces tumeurs sont généralement caractérisées par une croissance relativement rapide et la fixation de quantités accrues de calcium. Si elles sont dépistées à temps, leur développement peut être sensiblement retardé par un traitement approprié. En injectant du calcium-47 à un sujet dont on pense qu'il souffre ou risque d'être atteint d'un cancer des os, on parvient à dépister et à localiser les tumeurs, quel que soit leur siège, par suite d'une concentration anormale de ce radioélément qui est détectée à l'aide d'un compteur gamma. L'expérience prouve que cette méthode permet parfois un diagnostic plus précoce des tumeurs osseuses que la radiographie.

Outre l'intérêt qu'elle témoigne pour le métabolisme du calcium et la détection des tumeurs osseuses, la science médicale attache une importance particulière à un autre aspect du comportement du squelette; il s'agit d'une question qui relève des attributions de l'AIEA dans le domaine de la radioprotection. De nombreux radioéléments à longue période qui pénètrent dans l'organisme sont retenus dans le squelette, qui subit alors une irradiation plus forte que tout autre organe. Tel est notamment le cas du strontium-90. Afin de mettre au point une méthode efficace pour les éliminer du tissu osseux, il est nécessaire d'acquérir une connaissance approfondie des activités métaboliques du squelette et plus particulièrement des échanges de calcium.

Mise en oeuvre du programme de l'AIEA

L'attention de l'AIEA s'est portée sur le calcium-47 au cours d'une réunion scientifique tenue en 1958, lorsqu'il se révéla que plusieurs médecins s'intéressaient à l'utilisation de ce radioisotope mais que un ou deux seulement, dans le monde entier, pouvaient y recourir en raison de sa rareté et de son prix excessivement élevé. Vers la fin de la même année, le personnel scientifique de l'Agence et ses consultants établirent, après avoir étudié le problème, que la demande relative à ce radioisotope dépassait

considérablement sa production courante et qu'il existait des méthodes possibles de production qui seraient beaucoup plus économiques si on pouvait entreprendre la fabrication de quantités importantes. L'Agence a par la suite consacré une grande partie de son activité à stimuler une production plus économique et à démontrer l'intérêt du radioisotope s'il pouvait être produit à meilleur marché.

En 1959, une deuxième réunion de consultants de l'Agence a étudié en détail les méthodes de production et il s'est dégagé de ces travaux certaines lignes d'action. Un contrat de recherche a été octroyé, avec l'aide financière de la Commission de l'énergie atomique des Etats-Unis, en vue de mettre au point des méthodes plus économiques d'enrichissement du calcium en calcium-46, c'est-à-dire d'augmentation artificielle de la teneur du calcium naturel en calcium-46. On a incité les producteurs de calcium-47 à améliorer leurs techniques ; par exemple, plusieurs appareils supplémentaires pour l'enrichissement du calcium en calcium-46 ont été mis en service au Laboratoire national d'Oak Ridge, aux Etats-Unis. Des recommandations ont également été formulées au sujet de la pureté radiochimique du calcium-47 destiné à être utilisé chez l'homme.

Le contrat de recherche sur les méthodes d'enrichissement a permis de mettre au point de nouvelles méthodes, mais elles n'ont pas encore été appliquées du fait de l'augmentation qu'a connue entre-temps la production de calcium enrichi au moyen des méthodes existantes. Depuis 1958, le prix du calcium-47 est passé de plus de 1 400 dollars à 200 dollars le millicurie et son degré de pureté a été élevé.

A la fin de 1960, l'Agence avait octroyé 11 nouveaux contrats de recherche sur les applications du calcium-47 dans le diagnostic et les recherches médicales. Dans la plupart de ces contrats, l'Agence finançait uniquement le coût du radioisotope lui-même, de façon à supprimer un obstacle important à son utilisation et à encourager ainsi des chercheurs compétents qui disposaient du matériel nécessaire pour étudier ses applications possibles. Les contrats ont été octroyés dans les pays suivants : Afrique du Sud, Autriche, Belgique, Danemark, France, Pologne, Royaume-Uni et Suède.

La plupart de ces recherches sont maintenant en cours depuis près de deux ans et elles devraient se poursuivre pendant encore un an. On prévoit que, par la suite, le coût du calcium-47 ne sera pas excessif par rapport aux autres frais des recherches médicales et biologiques à l'aide de radioindicateurs, et on espère que les possibilités offertes par ce radioisotope seront largement reconnues par le corps médical. Le calcium-47 pourrait alors être traité

comme tous les autres radioisotopes utiles et ne pas exiger de subvention particulière.

Résultats de la recherche

Ce programme tendait surtout à faire de l'Agence un centre de renseignements sur le calcium-47. L'étude des problèmes spéciaux que pose le dosage du calcium-47 et des moyens les plus économiques de l'effectuer a été entreprise par le personnel scientifique de l'Agence ; ses conclusions ont été mises à la disposition des intéressés. En décembre 1961, l'Agence a réuni un groupe d'experts chargé de faire le point des progrès enregistrés grâce aux contrats de recherche octroyés par l'Agence. Tous les bénéficiaires de contrats de recherche sur le calcium-47 et quelques autres spécialistes avaient été invités à cette réunion. Chacun a fait part de son expérience avec le calcium-47, en le comparant aux autres isotopes du calcium dans le cadre de ses problèmes médicaux.

Les travaux de ce groupe d'experts ont clairement montré que les propriétés particulières du calcium-47 le rendent spécialement utile à maints égards et qu'utilisé avec le calcium-45 il élargit le champ d'application des méthodes de marquage par le calcium. Un groupe de chercheurs s'était servi du calcium-47 dans des études sur l'absorption du calcium à travers la paroi intestinale. Il a été démontré que l'absorption du calcium est modifiée par l'existence de certains troubles, notamment - comme on pouvait s'y attendre - de ceux qui affectent le squelette. Il a également été prouvé que l'absorption du calcium dépend dans une certaine mesure de la quantité de calcium contenue dans le régime alimentaire et de la nature de ce régime. Plusieurs chercheurs se sont attachés à étudier les voies du métabolisme à l'intérieur du corps. Après avoir injecté le radioisotope, on a suivi quantitativement la concentration dans le sang et dans les excréta ; on a essayé de décrire mathématiquement l'importance et la vitesse de renouvellement des pools métaboliques de calcium. On a tenté d'établir des rapports entre ces résultats et des états morbides ou des méthodes de traitement de maladies particulières. Dans plusieurs laboratoires, on a fait de très nombreux essais sur l'emploi du calcium-47 pour la localisation des tumeurs ; on a montré, à partir d'exemples précis, que ce radioisotope avait permis de dépister des tumeurs à un stade particulièrement peu avancé.

Il a été intéressant de constater qu'il était difficile de mesurer de façon exacte le calcium stable au moyen de méthodes chimiques, ce qui avait rendu aléatoire l'interprétation de certains résultats des recherches faites à l'aide d'indicateurs. Ceci indique qu'il est nécessaire de mettre au point des techniques de mesure bien définies pour permettre d'utiliser les radioindicateurs de façon efficace.

Le compte rendu des travaux de ce groupe a été récemment publié par l'Agence sous le titre "Medical Uses of Ca^{47} " (Collection Rapports techniques No 10).

En résumé, l'Agence s'efforce depuis quatre ans de faire adopter le calcium-47 dans les applications médicales courantes. A cet effet, elle a étudié

le besoin de ce radioisotope, stimulé sa production à plus bas prix, encouragé les recherches sur les possibilités qu'il offre dans le domaine médical et pris des mesures pour publier les renseignements ainsi obtenus. Le fait que le calcium-47 n'est plus considéré comme un radioisotope rare est dû au moins en partie aux efforts déployés par l'Agence, en collaboration avec des spécialistes du monde entier.

DATATION AU MOYEN DES RADIOISOTOPES

Peu de temps après la découverte de la radioactivité, on a entrepris de mesurer les radioéléments lourds existant dans la nature pour déterminer l'âge des roches (Rutherford, 1904); toutefois, les recherches sur la radiodation n'ont pris vraiment leur essor qu'à la suite d'un exposé que le professeur Libby a fait à l'occasion de la première Conférence des Nations Unies sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques, tenue à Genève en 1955, au cours duquel il a décrit comment son équipe de chercheurs avait mis au point une méthode de datation au moyen du carbone-14. Depuis cette époque, les laboratoires de nombreux pays ont réalisé des progrès rapides dans ce domaine; les géologues, les géophysiciens, les géochimistes et les archéologues ont joint leurs efforts à ceux des atomistes pour perfectionner les méthodes et élargir le champ de leurs applications.

Le professeur Libby a d'abord élaboré la théorie de la datation au moyen du radiocarbone; son équipe a trouvé du radiocarbone dans les eaux usées de Baltimore; elle a fait à l'échelon mondial des analyses de bois et a mis au point les procédures et le matériel de comptage nécessaires. Le professeur Libby et ses collaborateurs ont commencé par procéder à la datation d'échantillons d'âge connu, pour vérifier le bien-fondé de la méthode, avant de passer à des objets dont l'âge était inconnu. Les premiers résultats ont été publiés en 1952. Vers 1950, on s'intéressait surtout au fait que la méthode Libby utilisait le carbone-14 comme "chronomètre" et rendait possible la datation de trouvailles archéologiques et autres objets relativement récents. Depuis quelque temps, on s'intéresse de préférence à la détermination d'âges très lointains, qui remontent à l'origine même de notre système solaire, et on s'efforce également d'appliquer cette méthode à d'autres problèmes de la physique du globe, notamment à l'étude des mouvements de l'air et des masses d'eau et pour élucider l'origine et la nature des roches terrestres et des météorites.

Cette nouvelle tendance s'est fait nettement sentir durant le colloque international organisé par l'AIEA à Athènes, du 19 au 23 novembre 1962; en effet, bien qu'il fût consacré aussi à l'étude du carbone-14 et à l'archéologie, ce colloque a surtout été le siège de discussions sur des problèmes de géologie et de météorites. Il était placé sous le patronage de la Commission mixte de la radioactivité appliquée du Conseil international des unions scientifiques (CIUS) et de la Commission hellénique de l'énergie atomique.

Méthodes et possibilités

Le principe général de la radiodation consiste à mesurer la désintégration de certains radioisotopes et/ou la vitesse de formation d'autres radioisotopes de la chaîne de désintégration. Pour ramener les marges d'erreur au minimum, il faut connaître aussi exactement que possible la période des radioisotopes considérés et être sûr que, dans l'échantillon mesuré, l'activité du radioisotope n'a diminué que par désintégration naturelle. Il faut également être capable de mesurer de petites quantités de rayonnement, ce qui pose des problèmes difficiles à cause de l'inévitable bruit de fond produit par d'autres sources. Pour la radiodation, on utilise à la fois les radioisotopes naturels à très longue période dont l'existence remonte à la formation du globe et du système solaire (nucléosynthèse) et - plus récemment - les radioisotopes produits par le bombardement des rayons cosmiques, soit directement à la surface de la terre, soit dans l'atmosphère et au-delà.

Tout au début de la radiodation, on avait évalué à environ 5 600 ans la période du carbone-14 qui se forme dans l'atmosphère du fait de l'absorption de neutrons venant des rayons cosmiques par l'azote, dont la transformation donne ce radioisotope du carbone. D'après un mémoire présenté au colloque par deux chercheurs suédois de l'Université d'Uppsala (M.M. Olson et Karlén), il ressort de recherches toutes récentes effectuées à Uppsala par le National Bureau