

DECHETS FORTEMENT RADIOACTIFS

Méthodes de traitement et d'entreposage étudiées lors d'un colloque de l'AIEA

La gestion des déchets radioactifs produits dans les réacteurs constitue l'un des grands problèmes de l'industrie nucléaire ; en outre, l'essor de cette industrie s'accompagnant d'une augmentation du volume des déchets produits, l'importance de ce problème va croissant. S'il est impératif de réduire le plus possible les risques dus aux sous-produits radioactifs des opérations atomiques, il importe de veiller en même temps à ce que les mesures prises pour assurer la sécurité soient suffisamment pratiques et économiques pour pouvoir être appliquées à une grande échelle.

La question de la sécurité reste évidemment primordiale et l'on s'efforce dans tous les centres d'énergie atomique du monde de mettre au point des méthodes de gestion des déchets radioactifs présentant un maximum de sécurité et d'efficacité. Dès l'origine, l'Agence internationale de l'énergie atomique a estimé qu'une de ses tâches essentielles était de stimuler et de coordonner les efforts déployés en ce sens ; en fait, l'un des programmes les plus vastes de l'Agence porte sur ces activités. Une partie importante de ce programme a consisté à organiser des réunions scientifiques en vue d'examiner différents aspects de la gestion des déchets radioactifs.

Certains aspects de la question ont été et sont encore étudiés par de petits groupes d'experts réunis par l'Agence ; les problèmes scientifiques et techniques généraux font l'objet de réunions plus importantes. Dans l'organisation de ces travaux, l'Agence a groupé les problèmes en deux grandes catégories : ceux qui se rapportent à de grands volumes de déchets de faible activité ; ceux qui concernent les déchets relativement peu volumineux mais de très forte activité. Bien que la distinction entre faible et forte activité soit en grande partie une question de commodité, on classe d'habitude les déchets provenant de l'exploitation de petits réacteurs de recherche ou des applications des radioisotopes dans la catégorie des déchets de faible activité et ceux qui résultent du traitement du combustible irradié - notamment celui des centrales nucléaires - dans la catégorie des déchets de forte activité. Ces derniers présentent une radioactivité extrêmement forte, qu'ils conservent le plus souvent pendant de très longues périodes se chiffrant souvent par milliers ou même par centaines de milliers d'années. C'est la combinaison de ces deux caractéristiques qui rend la gestion de ces substances particulièrement difficile. Quant l'activité est très faible, on peut disperser les déchets dans le milieu ambiant ; mais les substances ayant un ni-

veau élevé d'activité doivent être isolées. Si les produits radioactifs ont une courte période, cet isolement peut n'être que temporaire ; mais les déchets ayant à la fois une forte activité et une longue période doivent être isolés du milieu humain pour des milliers d'années ou même davantage. En d'autres termes, ces déchets doivent être stockés de telle façon qu'ils ne puissent se libérer dans le milieu ambiant tant qu'ils constituent une source possible de danger ; avant de les stocker, il est habituellement nécessaire de leur faire subir des traitements chimiques appropriés.

Il s'agit là d'une tâche extrêmement complexe ; en fait, le traitement et l'entreposage des déchets fortement radioactifs constituent le problème majeur de la gestion des déchets. Le fait qu'aux Etats-Unis seulement quelque 200 millions de litres de déchets sont stockés dans des réservoirs souterrains permet d'évaluer l'importance de ce problème. Si l'on tient compte de l'envergure du programme nucléaire de certains autres pays et de l'essor probable de l'énergie d'origine nucléaire dans de nombreuses régions du monde, on peut évaluer approximativement les énormes quantités de déchets fortement radioactifs qu'il y aura lieu de stocker avec soin dans les années à venir.

Colloque international de Vienne

Les méthodes de traitement et d'entreposage des déchets fortement radioactifs ont été examinées lors d'un colloque international organisé par l'Agence, à Vienne, du 8 au 12 octobre 1962. Ce colloque a réuni 130 spécialistes représentant 19 pays ainsi que l'Agence européenne pour l'énergie nucléaire et l'EURATOM.

Outre une étude d'ensemble des problèmes et pratiques, le programme du colloque contenait les sujets suivants : 1) concentration et stockage ; 2) solidification et fixation des liquides par calcination ; 3) solidification et fixation par vitrification ; 4) solidification et fixation par diverses méthodes ; 5) traitement des déchets solides ; 6) expédition de grandes quantités de radionucléides. Les différentes séances du colloque ont été présidées par les personnalités suivantes : P. Dejonghe (Belgique), F. Duhamel (France), E. Glueckauf (Royaume-Uni), L. P. Hatch (Etats-Unis), B. Kolytchev (URSS) et D. Pearce (AIEA).

A l'ouverture du colloque, M. Pierre Balligand, Directeur général adjoint chargé des opérations techniques de l'Agence, a indiqué que c'était la première

fois que l'Agence organisait une réunion scientifique spécialement consacrée à l'examen des problèmes liés à la gestion des déchets provenant du traitement chimique des combustibles nucléaires. M. Balligand a ajouté que cette réunion n'avait pas été organisée plus tôt parce que les données sur les plans, la construction et le fonctionnement de plusieurs installations de démonstration pour le traitement et l'entreposage des déchets fortement radioactifs n'étaient disponibles que depuis peu de temps. M. Dennis Pearce, Directeur de la Division de la santé et de la sécurité et de l'élimination des déchets, a déclaré que les renseignements mis en commun durant le colloque serviraient, non seulement aux hommes de science des pays avancés qui se sont déjà attaqués à ces problèmes, mais aussi aux spécialistes des pays où ces problèmes se poseront dans un proche avenir.

Les mémoires présentés ont décrit les pratiques de gestion des déchets fortement radioactifs actuellement suivies dans les pays avancés ainsi que l'orientation des recherches entreprises pour mettre au point de meilleures solutions du problème. Les renseignements fournis au cours du colloque ont clairement montré que ce problème est résolu de façon assez semblable par tous les pays s'occupant des déchets fortement radioactifs. Il en ressort que, dans presque tous les cas, ces déchets sont à présent entreposés dans des réservoirs souterrains - la plupart en acier inoxydable ou en béton. Toutefois, la radioactivité de certains déchets peut durer plus longtemps que les réservoirs les plus solides; aussi a-t-on cherché dans tous les pays une méthode appropriée pour solidifier les déchets ou les fixer dans des matières solides, de manière à empêcher qu'ils se dispersent dans le milieu ambiant après que les récipients se seront détériorés. Dans l'ensemble, les experts ont reconnu que la solution définitive du problème des déchets fortement radioactifs consiste à les immobiliser de manière à assurer un isolement permanent de tout contact humain.

En ce qui concerne la solidification et la fixation, on a envisagé surtout deux possibilités : 1) la calcination, c'est-à-dire le chauffage des déchets liquides permettant leur transformation en oxydes solides; 2) la vitrification, c'est-à-dire la fixation et l'incorporation des déchets dans du verre ou des substances vitreuses. Dans l'ensemble, les experts ont estimé que la formation d'oxydes solides représenterait un progrès considérable vers l'immobilisation des déchets, mais qu'elle ne saurait constituer une solution permanente du fait que, dans certaines conditions, les substances radioactives incorporées dans les oxydes pourraient se libérer et éventuellement atteindre le milieu ambiant. En revanche, la fixation dans du verre serait pratiquement définitive et plusieurs des mémoires présentés au colloque traitaient des efforts déployés en vue de mettre au point cette méthode.

Plans et pratiques en vigueur

Dans un mémoire sur la concentration et le stockage des déchets de haute activité au cours des premiers stades du programme civil de production d'énergie d'origine nucléaire au Royaume-Uni, M. D. W. Clellant (Royaume-Uni) a exposé qu'il se produit deux catégories de déchets fortement radioactifs au cours du traitement du combustible irradié provenant de réacteurs. Les premiers sont des déchets solides, constitués par les gaines des cartouches de combustible; on les stocke dans des silos en béton et ils ne posent "aucun problème technique excessivement difficile". Les seconds sont des déchets liquides, obtenus lors de la dissolution du combustible irradié dans l'acide nitrique et du traitement pour séparer l'uranium et le plutonium des produits de fission; les déchets sont constitués par les produits de fission après extraction de l'uranium et du plutonium.

M. Clellant a indiqué que la méthode actuellement suivie au Royaume-Uni pour traiter les déchets liquides de haute activité implique tout d'abord la concentration du liquide acide par évaporation, suivie du stockage dans des réservoirs en acier inoxydable logés dans des cellules à murs épais en béton. Les murs, revêtus d'acier inoxydable, constituent un isolant secondaire; la chaleur produite par la désintégration des déchets est éliminée en faisant circuler de l'eau dans des serpentins de refroidissement aménagés dans les réservoirs.

Décrivant la concentration et le stockage des produits de fission à l'usine d'extraction de plutonium de Marcoule, MM. M. Chambon et J. Rodier (France) ont expliqué que les effluents de très haute activité de l'usine sont tout d'abord concentrés par évaporation à la pression atmosphérique. La solution concentrée de produits de fission est ensuite transférée, par gravité, dans des cuves en acier inoxydable d'une capacité utile de 60 m³. Les déchets sont refroidis par circulation d'eau, en circuit fermé, dans la piscine où est immergée chaque cuve et dans des serpentins intérieurs. On contrôle en permanence le volume et la température des liquides stockés ainsi que la pression dans les cuves de stockage et l'activité des circuits de refroidissement.

MM. B. F. Campbell, E. Doud et R. E. Tomlinson (Etats-Unis) ont décrit, dans leur mémoire, les pratiques actuelles de stockage des déchets aux Etats-Unis. Les déchets radioactifs de haute activité sont "répartis en deux catégories selon leur teneur relative en produits de fission". Dans l'une des catégories entrent les déchets dits "à auto-échauffement", c'est-à-dire ceux dans lesquels la désintégration de produits de fission provoque un dégagement de chaleur suffisant pour amener le liquide à ébullition; l'autre catégorie contient les déchets "sans échauffement", c'est-à-dire les déchets présentant une activité moindre mais dont la teneur en matières radioactives exi-

ge néanmoins qu'ils soient stockés. En ce qui concerne les premiers, il faut prendre des dispositions spéciales pour éliminer sans danger la chaleur dégagée.

En ce qui concerne le stockage, on a recours aux Etats-Unis à une grande variété de réservoirs, selon le volume et la composition des déchets, les conditions ambiantes et les caractéristiques des matériaux. La capacité de la plupart des réservoirs varie entre 1 et 5 millions de litres ; leur diamètre est compris entre 15 et 25 mètres et leur profondeur utile va de 6 à 10 mètres. En général, les réservoirs sont recouverts de 2 à 3 mètres de terre qui joue le rôle d'un écran contre les rayonnements. Les auteurs ont décrit le réservoir utilisé à Hanford pour le stockage des déchets à auto-échauffement : réservoir en béton armé revêtu d'acier ordinaire jusqu'au-dessus du niveau du liquide, mais sans revêtement sur le haut.

Dans un autre mémoire, R. E. Tomlinson a décrit le programme de gestion des déchets de haute activité à la centrale de Hanford, aux Etats-Unis. Ce programme vise à assurer la sécurité en réduisant les risques au minimum, à récupérer les sous-produits comme l'exige la Commission de l'énergie atomique et à diminuer le coût de la gestion des déchets. On est parvenu à la conclusion que la meilleure méthode de gestion des déchets de haute activité à Hanford consistait à combiner leur fractionnement avec leur solidification en réservoir. Bien qu'un simple stockage permanent dans des réservoirs soit moins coûteux, l'augmentation des frais qu'entraîne le fractionnement est justifiée du fait que cette opération offre une plus grande certitude au sujet du confinement à long terme des nucléides dangereux et qu'elle facilite la récupération des produits de fission. Aussi les études et recherches sont-elles orientées vers la mise au point de la technologie requise. Cependant, M. Tomlinson a souligné que ces conclusions s'appliquaient plus particulièrement aux conditions de Hanford et qu'elles n'étaient pas nécessairement valables pour d'autres sites.

Passant en revue les programmes actuels et futurs aux Etats-Unis, W. G. Belter (Etats-Unis) a déclaré : "Alors que du point de vue économique il semblerait rationnel d'utiliser pour le stockage provisoire des récipients de type connu et de les entreposer dans des sites qui réunissent les conditions géologiques et hydrologiques voulues, les difficultés inhérentes à cette opération, telles que le risque de fuite et la nécessité du transfert des déchets liquides pendant des périodes extrêmement longues, ont donné lieu à l'exécution aux Etats-Unis d'un vaste programme de recherches et de mises au point qui comporte l'établissement de systèmes pratiques d'élimination définitive de ces matières". Le programme de gestion des déchets de haute activité établi par la

Division de mise au point des réacteurs de la Commission de l'énergie atomique repose sur deux conceptions : 1) transformation de ces déchets en oxyde solide ou fixation de l'activité par un entraîneur solide, chimiquement inerte et résistant à l'élution ; 2) évacuation directe dans certaines formations géologiques telles que structures salines, roches cristallines imperméables, etc.

Au cours d'un aperçu général des méthodes et plans appliqués dans son pays en matière de gestion des déchets, M. V. Kolytchev (Union soviétique) a fait savoir que le procédé actuellement suivi consistait à traiter les déchets liquides pour réduire leur volume et concentrer leur activité, puis à entreposer les déchets ainsi concentrés dans des réservoirs en acier inoxydable. Ayant compris que les réservoirs d'acier ne pouvaient être utilisés pour le stockage définitif, les spécialistes de l'Union soviétique ont entrepris d'importants travaux de recherche visant à transformer les déchets de manière à leur donner une forme mieux appropriée pour un enfouissement permanent. Ils ont envisagé d'employer des lits salins, mais cette méthode ne semble pas convenir pour les déchets liquides ni présenter des avantages particuliers pour les déchets solides. L'enfouissement des déchets liquides dans des formations géologiques profondes serait une méthode fort séduisante, mais elle est très difficile à étudier et les résultats que donnent les essais ne peuvent jamais être considérés comme tout à fait sûrs.

"Nous estimons", a dit M. Kolytchev, "que le meilleur procédé d'évacuation des déchets radioactifs consiste à les solidifier et surtout à les fixer dans du verre avant de les enfouir ; c'est grâce à cette méthode que nous serons à l'avenir en mesure de les évacuer dans le sol de façon définitive et de procéder à ces opérations sans crainte, avec un contrôle efficace".

Méthodes de solidification

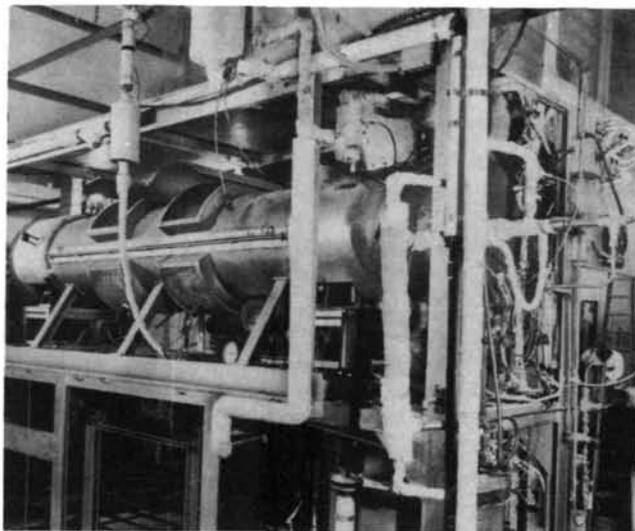
Les spécialistes venus des Etats-Unis ont présenté plusieurs mémoires portant sur différentes méthodes de solidification des déchets radioactifs liquides par calcination, c'est-à-dire par chauffage à haute température. W. R. Regan, L. P. Hatch et R. F. Demish ont fait ressortir dans leur mémoire que la calcination de déchets de haute activité et à forte teneur en sel - qui permet de convertir les sels en des solides compacts - présente d'importants avantages : réduction considérable du volume et simplification générale des problèmes que pose le stockage à long terme. Ils ont décrit un dispositif de calcination actuellement à l'étude au Laboratoire national de Brookhaven, qui est fondé sur le principe du four rotatif à billes. Il consiste essentiellement en un four en forme de tube horizontal tournant lentement et chauffé extérieurement par des résistances électriques.

Les déchets liquides introduits dans le four par une tuyère de distribution tombent sur un lit chaud de billes métalliques et les solides calcinés en poudre débordent par l'extrémité de décharge du four et sont recueillis dans un réservoir.

Quatre autres spécialistes des Etats-Unis - W.E. Winsche, M.W. Davis Jr., G.B. Goodlett Jr. et E.S. Occhipinti - ont décrit une nouvelle méthode de calcination fondée sur certaines propriétés spécifiques du soufre, qui fait l'objet d'une mise au point au Laboratoire de Savannah River. Selon cette méthode, on fait réagir les déchets liquides acides avec du soufre fondu à 150°C : l'eau et les acides volatils sont chassés, puis les composés chimiques présents dans les déchets sont calcinés et/ou réduits chimiquement. Pour obtenir une calcination et/ou réduction plus poussée, il faut chauffer la suspension soufre-déchets ainsi obtenue à une température de 400 à 444°C afin de chasser l'acide sulfurique et l'eau résiduelle. Au cours de ces opérations, le soufre fondu sert notamment de milieu caloporteur. Une fois terminé le traitement à haute température, on laisse refroidir la suspension soufre-déchets jusqu'à 120 ou 150°C et on la transvase ensuite dans le milieu d'isolement final, où on la laisse se solidifier.

Trois autres méthodes de calcination décrites au colloque sont connues sous les noms de calcination en pot, calcination en lit fluidisé et calcination par pulvérisation et chauffage radiant. La méthode de calcination en pot, qui est étudiée au Laboratoire national d'Oak Ridge, comporte l'évaporation des déchets liquides dans un pot qui servira ensuite de récipient de stockage définitif; les opérations de calcination ont lieu à des températures allant de 700 à 900°C. La méthode de calcination en lit fluidisé consiste à injecter les déchets en solution par des tuyères de pulvérisation dans des lits fluidisés où l'eau s'évapore, où l'acide nitrique se décompose en eau et en oxyde d'azote et où des nitrates métalliques sont transformés en oxydes métalliques correspondants. Le procédé de calcination par pulvérisation et chauffage radiant consiste à introduire les déchets liquides par une tuyère pneumatique dans l'extrémité supérieure d'une tour; la température des parois est portée à 800°C par le passage d'un courant de basse tension à travers toute la colonne, tandis que des gouttelettes d'eau descendent dans la tour en traversant successivement les zones d'évaporation, de séchage et de calcination.

Malgré les avantages que présente la calcination des déchets liquides par rapport à leur stockage en réservoirs pratiqué actuellement, cette méthode ne permet pas, comme on l'a fait observer plus haut, de fixer les déchets pour toujours; les oxydes formés par calcination ne résistent pas à la lixiviation, de sorte que dans certaines conditions les substances radioactives pourraient se libérer et atteindre



Appareil à calciner rotatif (conçu pour une usine pilote) pour la solidification des déchets fortement radioactifs (Extrait du mémoire de W.H. Regan, L.P. Harch et R.F. Demish)

le milieu ambiant. On a fait observer que la calcination présentait un intérêt considérable par rapport aux méthodes de stockage actuelles, mais qu'elle ne pourrait constituer qu'une phase intermédiaire en attendant l'élimination "définitive"; une fixation beaucoup plus efficace, voire pratiquement permanente, serait réalisée par l'incorporation des déchets dans une matière solide appropriée et non susceptible de lixiviation, comme le verre. Durant ces dernières années, de nombreux chercheurs se sont efforcés de mettre au point des méthodes de fixation des déchets radioactifs dans le verre; d'intéressants résultats ont été signalés au colloque par des spécialistes du Royaume-Uni, des Etats-Unis et d'autres pays.

On a fait ressortir que la fixation des déchets radioactifs dans du verre permettait d'obtenir un produit final possédant plusieurs propriétés intéressantes. Ainsi, les résidus solides vitrifiés ne sont pas volatils jusqu'à des températures égales à celles de leur formation; ils possèdent une bonne résistance mécanique de sorte que leur isolement n'est pas conditionné par l'intégrité d'une enveloppe extérieure; ils ont une bonne conductibilité thermique qui réduit au minimum les problèmes de transfert de chaleur; ils accusent une faible solubilité dans les agents d'érosion du milieu ambiant. Il n'est pas nécessaire que le produit soit composé de verre véritable s'il possède les propriétés mentionnées.

W.E. Clark et H.W. Godbee (Etats-Unis) ont décrit les travaux actuellement exécutés au Laboratoire national d'Oak Ridge en vue de mettre au point une méthode d'incorporation des déchets de haute activité dans du verre insoluble de densité élevée, tous les éléments radioactifs se trouvant contenus dans la



Produit vitrifié contenant des déchets radioactifs
(Extrait du mémoire de M.N. Elliot, R. Gayler,
J.R. Grover et W.H. Hardwick)

partie solide. Les expériences faites jusqu'à présent ont montré qu'une telle méthode était techniquement réalisable.

La méthode de fixation dans des éponges en matière céramique a été décrite dans le mémoire de W.G. Belter cité plus haut. Elle comporte la préparation d'une masse d'argile poreuse qui est cuite à une température d'environ 1 100°C. Cette masse est ensuite plongée dans les déchets liquides, séchée et réimbibée, cette opération étant répétée à plusieurs reprises. Finalement, elle est portée à 1 300°C en vue de fixer les radionucléides de façon définitive dans la matière céramique.

L. P. Hatch, G. C. Veth et E. J. Tuthill (Etats-Unis) ont exposé une méthode actuellement en voie d'élaboration au Laboratoire national de Brookhaven, dans laquelle la transformation - depuis le déchet liquide à l'état brut jusqu'au produit vitreux final - s'opérerait entièrement en phase liquide.

Décrivant une expérience faite à l'usine pilote de Harwell sur la fixation des déchets radioactifs dans du verre, M. N. Elliot, R. Gayler, J. R. Grover et W. H. Hardwick (Royaume-Uni) ont apporté des précisions sur un procédé qui vise à transformer des produits de fission hautement radioactifs en verre non susceptible de lixiviation, protégé par des cylindres en acier inoxydable et pouvant renfermer jusqu'à 40 % des oxydes éliminés. Les cylindres constituent l'élément essentiel de cette méthode, qui permet un stockage d'une durée pratiquement infinie. Des expériences à l'usine pilote ont montré que le procédé était parfaitement applicable; on a pu réaliser de nombreux cycles complets ayant mené à la production de 50 kg de blocs de verre non susceptible de lixiviation

à partir de solutions simulant les caractéristiques des effluents de faible activité. La phase suivante consistait à utiliser des solutions suffisamment radioactives pour permettre de mesurer les facteurs de décontamination relatifs aux principaux produits de fission et d'essayer les techniques de télécommande. On a étudié et construit une usine pilote pouvant produire des blocs de verre contenant 1 000 curies de matières radioactives.

Un mémoire sur l'incorporation de radioisotopes dans des silicates fondus, présenté par J. Rálková et J. Saidl (Tchécoslovaquie), a rendu compte de travaux de recherche qui avaient pour but de choisir des matériaux (roche fondue ou silicate vitrifiable) se prêtant à l'incorporation de radioisotopes à longue période biologiquement dangereux, et de déterminer les facteurs capables de diminuer la vitesse de libération des radioisotopes incorporés.

Sujets divers

Dans les régions qui possèdent des formations géologiques appropriées, on pourrait stocker les déchets fortement radioactifs sans aucun traitement préalable, du fait que les caractéristiques des lieux de stockage assurent une protection suffisante contre leur libération dans le milieu ambiant. Aux Etats-Unis, on a fait plusieurs études sur la possibilité d'évacuer des déchets de haute activité, liquides et solides, dans les structures salines. Les formations salines naturelles présentent beaucoup d'intérêt pour le stockage des déchets radioactifs; elles sont imperméables grâce aux propriétés plastiques du sel, elles offrent une bonne conductibilité thermique, elles sont hautement résistantes et le sel "ne s'associe pas à l'eau des nappes souterraines utilisables". Des spécialistes des Etats-Unis ont déclaré que le stockage de déchets fortement radioactifs dans les mines de sel constituait une solution intéressante, bien que certains de ses aspects exigent une étude plus approfondie. En ce qui concerne l'évacuation des déchets solides, on ne connaît pas encore très bien l'effet combiné de la chaleur et de la pression sur la stabilité des galeries souterraines. Comme pour les déchets liquides, il convient de résoudre certains problèmes que posent la formation de gaz par décomposition radiolytique et les altérations dans les cavités des mines de sel.

Parmi les autres sujets examinés au colloque figurait le transport de grandes quantités de radionucléides utiles, extraits des déchets. Certains produits de fission radioactifs, comme le strontium-90, le césium-137 et le cérium-144, jouent un rôle important comme sources de chaleur et de rayonnements. Etant donné que ces produits ne peuvent être fournis que par des installations éloignées des centres de consommation, il faut prendre des mesures spéciales pour leur emballage et leur transport. Ces envois risquent de subir divers accidents; aussi le colloque

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.