

Energie nucléaire, sécurité et environnement

par Sigvard Eklund
Directeur général
de l'Agence internationale de l'énergie atomique

Les récents événements ont mis en vedette les problèmes énergétiques. Dans la plupart des pays industrialisés, des mesures doivent être prises sans attendre pour faire face à la pénurie que l'on prévoit pour les dix prochaines années. Il est cependant intéressant aussi d'étudier ce qui pourrait se passer jusqu'à la fin du siècle et même d'extrapoler jusqu'à l'an 2100. Aussi est-il nécessaire de faire quelques observations au sujet de la demande et de l'offre globales d'énergie à long terme.

Dans le présent article nous nous efforcerons de présenter un tableau d'ensemble de la situation de l'énergie d'origine nucléaire dans le monde et des problèmes que pose cette nouvelle source d'énergie, ainsi que de la manière dont on les aborde. Un pays décide d'apporter à ses problèmes énergétiques des solutions qui dépendent évidemment de ses propres ressources naturelles, de son degré d'industrialisation et d'autres facteurs qui ne peuvent s'appliquer d'une manière générale au monde entier.

La population mondiale était en 1900 de 1 600 000 000, elle est actuellement de 3 600 000 000 et doit atteindre 6 100 000 000 à la fin du siècle. Et encore ne sera-ce pas là le terme. La Banque mondiale, dans une étude faite en 1970, estimait que si les pays industrialisés obtiennent un taux de croissance démographique nul en l'an 2000 et que les pays en voie de développement atteignent le même objectif en 2050, la situation se stabiliserait en 2120 seulement avec une population mondiale de 15 milliards d'habitants.

Il y a de toute évidence un lien entre les besoins en énergie et le chiffre de la population mondiale, et il en existe un également entre le niveau de vie et la consommation d'énergie. Pour donner une idée de l'évolution de la consommation d'énergie, je dirai que depuis les premiers temps de l'humanité jusqu'à 1970, la consommation totale d'énergie a été, estime-t-on, de 6 Q, Q étant égal à $2,5 \times 10^{14}$ thermies. Au cours de la seule année 1970, la consommation d'énergie

a été de 0,2 Q et pour la période allant de 1971 à l'an 2000, on l'estime à 13 Q.

Actuellement, la consommation d'électricité par individu aux Etats-Unis correspond à 10 kW thermiques. A la fin du siècle prochain, un recyclage considérable des matières brutes sera indispensable, l'hydrogène pourra être produit pour être utilisé à la fois aussi bien comme agent réducteur que comme moyen de transfert d'énergie, l'eau sera dessalée, les égouts seront épurés, etc. Un effort plus dur devra être fait pour extraire des matières premières de gisements pauvres. Ces considérations nous amènent à conclure, aux fins de la planification, à un doublement de la consommation par individu. Admettons encore que cette consommation par individu sera la même dans le monde entier, hypothèse qui peut évidemment être mise en doute, mais qui figure dans les objectifs de développement des nations peu industrialisées. Si tel était le cas, la consommation cumulative d'énergie en l'an 2100 serait de 400 Q, ce qui est évidemment un chiffre très important. Il faut bien alors

se demander quelle est l'ampleur des ressources énergétiques dont on dispose actuellement.

Quel est le potentiel des sources d'énergie renouvelables? L'énergie hydroélectrique représente 0,2 Q par an, la photosynthèse la moitié de ce chiffre, et l'énergie hydrogéo-thermique, marémotrice et éolienne représente de 10 à 1 000 fois moins. Le total du rayonnement solaire représente 3 000 Q par an et l'utilisation des gradients thermiques des océans pourrait donner 200 Q. Il faut cependant remarquer que nous ne connaissons pas les limitations techniques et économiques liées à ces deux dernières sources d'énergie.

Les sources d'énergie non renouvelables, le charbon et le lignite, tels qu'on les connaît et en admettant un coût raisonnable de récupération, représentent 200 Q, le pétrole 10 Q et le gaz naturel 6 Q. L'énergie géothermique des roches chaudes est, pense-t-on, de l'ordre de 600 Q et le contenu énergétique des schistes bitumineux de 4 000 Q. A ce jour, cependant, aucune méthode n'a été conçue pour utiliser l'énergie géothermique à grande échelle et la valeur énergétique des schistes bitumineux est très hypothétique, car il faudrait bouleverser de si énormes quantités de terre que l'exploitation en grand des schistes ne serait pas acceptable.

Il ressort à l'évidence de ce qui précède que d'après les hypothèses faites, c'est-à-dire une population mondiale de 15 milliards d'individus et une consommation d'énergie de 20 kW thermiques par individu, les combustibles fossiles ne suffiront pas à répondre aux besoins accumulés, même jusqu'à la fin du siècle prochain.

ENERGIE D'ORIGINE NUCLEAIRE

Qu'en est-il du potentiel de l'énergie d'origine nucléaire? L'uranium est un élément très largement répandu dans la croûte terrestre; son contenu énergétique dépend du prix que nous accepterons de payer son extraction. Si l'on considère uniquement l'uranium à bon marché d'aujourd'hui, de 5 à 10 dollars par

livre d'oxyde d'uranium, les ressources connues représentent 0,9 Q si on les utilise dans des réacteurs à eau légère et 100 fois plus dans des réacteurs surgénérateurs. Si nous considérons un uranium plus cher, de l'ordre de 30 à 50 dollars par livre d'oxyde, l'utilisation dans des réacteurs à eau légère représenterait 5 Q et 500 Q dans les surgénérateurs — dans le premier cas en ajoutant quelques mills (un millième de dollar) au prix de revient du kWh et seulement 0,2 mill dans le dernier cas. Le thorium représente une réserve du même ordre de grandeur.

Pour en revenir à la situation générale de l'énergie et à son développement prévu pour les 30 prochaines années, il est essentiel d'admettre qu'aucune découverte technologique ne peut avoir d'effet dans l'immédiat mais au plus tôt dans 10 ans. Des mesures doivent être prises pour un meilleur usage de la chaleur résiduelle du cycle thermique, et des décisions doivent être prises pour limiter l'augmentation annuelle, actuellement presque automatique, de la consommation d'énergie; ces décisions sont cependant très graves et produiraient un effet de choc sur la société dans son ensemble.

L'énergie d'origine nucléaire représente pour les 10 prochaines années la seule possibilité technologique suffisamment au point pour ajouter des quantités appréciables d'énergie nouvelle au bilan énergétique. Pour répondre aux besoins futurs après cette période au moyen de cette forme d'énergie, il faudrait se prononcer d'ores et déjà sur certaines mesures à prendre. Les opérations de forage pour la recherche d'uranium dans plusieurs pays industrialisés devront être considérablement activées car les réserves confirmées, par mètre de forage, ont très fortement diminué au cours des dernières années. En particulier dans les pays en voie de développement, les nouveaux gisements découverts doivent être explorés et les opérations d'extraction entreprises. Comme la plupart de l'énergie d'origine nucléaire au cours de la décennie sera produite par des filières à eau légère, l'approvisionnement



en uranium enrichi doit être assuré. Ainsi par exemple, aux Etats-Unis, la capacité d'enrichissement et de production des installations d'enrichissement actuelles doit être accrue, même si ce pays ne livre qu'une certaine fraction de l'uranium enrichi dont le monde a besoin. Le reste de la demande devra être satisfait par d'autres installations d'enrichissement, celles de l'Union soviétique ou des consortiums actuellement constitués en Europe.

A partir de 1985 environ, on aura les résultats de l'expérimentation des prototypes de surgénérateurs américains, anglais, français, allemands et japonais. Tout bien pesé, il est peut-être plus sûr de compter que les surgénérateurs ne pourront pas être produits par l'industrie avant 1990 et qu'ils n'apparaîtront sur le marché que très progressivement. Selon une prévision optimiste, ces réacteurs représenteront au début de cette décennie de 4 à 14 pour cent de la puissance nucléaire installée.

Quant à la fusion, il convient de rappeler qu'il a fallu 25 ans depuis la première réaction en chaîne en 1942 pour que les premiers réacteurs nucléaires de puissance deviennent commercialement compétitifs. Nous n'avons pas encore, malgré d'énormes progrès, assisté à l'expérience décisive qui nous démontrera que la fusion produit plus d'énergie qu'elle n'en absorbe. On peut donc en déduire que ce ne sera pas avant le siècle prochain que la fusion pourra s'inscrire sur la liste des ressources énergétiques.

Etant donné ce qui précède, il est clair que la fission est la seule solution actuelle de remplacement si l'humanité veut éviter une réelle pénurie d'énergie dans le proche avenir. Il faudra attendre très longtemps avant d'avoir le résultat des programmes intensifs d'étude et de réalisation concernant d'autres sources d'énergie, qui

devraient commencer sans plus attendre. Au cours de la période 1980-1990, on pourra constater les effets des progrès techniques réalisés au cours de la décennie précédente. Il s'agira probablement de la liquéfaction ou de la gazéification du charbon, de la remise en exploitation de puits de pétrole abandonnés, de l'utilisation de l'énergie solaire dans les régions propices et de l'exploitation des sources géothermiques, des gradients des océans et des schistes bitumineux. Sans être trop pessimiste, en tenant compte de l'inertie propre à l'industrie des services publics, il est peut-être sage de ne compter que sur des compléments marginaux provenant de ces sources d'énergie.

L'énergie d'origine nucléaire représente en ce moment environ 3% de la capacité de production d'électricité dans le monde. Ces 3% sont produits par 128 réacteurs de 16 pays, d'une puissance totale de quelque 35 000 MW(e). On peut ajouter que le nombre de réacteurs de puissance en service cette année doit atteindre 167 avec une puissance de 61 000 MW(e), ce qui montre à quel point l'expansion est rapide. En 1980, l'énergie d'origine nucléaire représentera 14% de la production totale d'électricité, et 50% à la fin du siècle. On notera qu'il y a actuellement 346 réacteurs de recherche dans 45 pays.

SECURITE

La sécurité nucléaire a fait l'objet de longues discussions ces dernières années bien que l'industrie nucléaire dans son ensemble ait obtenu des résultats sans précédent dans ce domaine avec un minimum d'accidents. J'ai appris récemment à l'usine de Savannah River, aux Etats-Unis, que le nombre d'accidents était le quarantième de ce que l'on constate dans les industries chimiques ayant des activités correspondantes. L'Agence internationale de l'énergie atomique publie chaque année une liste des réacteurs de puissance et des réacteurs de recherche dans ses 104 Etats Membres, ainsi qu'un rapport annuel sur l'expérience acquise dans l'exploitation des centrales nucléaires. En

Vue d'ensemble de la centrale nucléaire d'Oskarshamn-I, en Suède. Cette installation dotée d'un réacteur à eau bouillante a une puissance de 440 MW(e). Photo ASEA-ATOM

1972, le total des années d'exploitation de réacteurs était de 1 000. Il est tout à fait remarquable qu'au cours de ces 1 000 années il ne se soit produit aucun accident comportant des rejets de quantités dangereuses de radioactivité dans l'environnement d'un réacteur de puissance.

Il y a 20 ans, les problèmes de la sûreté des réacteurs nucléaires étaient très mal définis. La situation est différente aujourd'hui et l'on peut analyser l'incidence des modifications des plans sur la sûreté des réacteurs. L'énergie d'origine nucléaire peut être aussi inoffensive qu'on peut le souhaiter à condition d'y mettre le prix. Cette décision est une décision sociale qui doit être prise en dernier ressort par les utilisateurs d'après les renseignements fournis par les spécialistes. Il faut se rappeler que l'évaluation des risques en tant que discipline scientifique en est à ses débuts. Il semble qu'il y ait une différence d'un facteur de 1 000 entre risques volontaires et risques involontaires, et il semble également qu'il y ait un rapport entre les risques et les avantages escomptés. En général, le public semble illogique pour ce qui est des risques qu'il connaît et peut prévoir. En Suède, par exemple, environ 1 200 personnes sont tuées chaque année dans des accidents d'automobile et environ 20 000 sont grièvement blessées. Cette situation est acceptée comme inévitable et un accident mortel n'est que brièvement signalé dans les journaux. Un accident de chemin de fer est annoncé en gros titre, même s'il n'y a pas de victimes, et un accident d'avion attire le plus l'attention. La probabilité d'un accident de réacteur nucléaire est si faible qu'il est difficile de lui donner une interprétation significative. La crainte qu'éprouve naturellement l'homme devant l'inconnu, jointe aux pensées qu'éveille la bombe atomique, est probablement largement responsable de la réaction émotionnelle devant les dangers de l'énergie d'origine nucléaire.

Les différents types de réacteurs présentent différents problèmes de sécurité. La haute densité d'énergie qui existe dans le cœur d'un réacteur à eau légère exige que

d'extrêmes précautions soient prises pour que les conséquences d'un accident ne soient pas trop graves, compte tenu tant de la radioactivité que de la toxicité du combustible irradié. La différence entre les réacteurs à eau légère à combustible recyclé contenant du plutonium et les surgénérateurs n'est peut-être pas très grande à cet égard.

Dans ce contexte, il est bon de rappeler que la prépondérance actuelle des réacteurs à eau légère peut fort bien ne pas se maintenir à longue échéance. Le réacteur à eau lourde et le réacteur à haute température refroidi par un gaz se font déjà leur place sur le marché. L'un et l'autre représentent des filières qui, du point de vue de la sûreté, sont certainement plus faciles à analyser que le surgénérateur; ils peuvent utiliser le thorium et le réacteur à haute température, en particulier, offre la possibilité de fournir de la chaleur industrielle. La stratégie de la combinaison des filières a été étudiée pour la première fois lors d'une réunion de spécialistes tenue à l'AIEA en novembre 1973.

Le débat public sur les précautions indispensables a, selon moi, dépassé son objectif. Pourquoi le public croirait-il que les constructeurs de réacteurs nucléaires ont un moindre sens de leurs responsabilités que par exemple leurs collègues de l'industrie aéronautique? Le public a-t-il jamais demandé que lui soient intégralement exposées les conditions de stabilité d'un avion géant à réaction au moment de la manœuvre d'atterrissage? Pour le profane, elles sont aussi difficile à comprendre que la description détaillée du système de refroidissement d'urgence du cœur d'un réacteur. Nous voulons tous vivre en harmonie avec la nature sans toutefois devoir renoncer aux avantages de la technologie. Le public ne doit pas douter que les spécialistes de l'énergie atomique tiennent le plus grand compte de ce désir.

Les prescriptions très strictes qui doivent être observées également en ce qui concerne la surveillance ont fait naître l'idée de construire des installations nucléaires

groupées sur des sites bien adaptés. Un groupe pourrait comprendre un certain nombre de grands réacteurs de puissance, parfois aussi une usine de retraitement avec des installations de stockage pour les déchets radioactifs. Lorsqu'on a à l'origine lancé cette idée aux Etats-Unis, on prévoyait des réacteurs d'une puissance de 5 000 MW(e). On peut même envisager d'adjoindre au groupe un complexe industriel ou agricole utilisant l'énergie disponible à des fins industrielles, notamment la production d'hydrogène et le dessalement de l'eau. Un site de ce genre peut être plus efficacement protégé, et à moindres frais, contre les sabotages et les accidents que ne peuvent l'être des installations isolées.

A cet égard, on ne peut ignorer la possibilité pour certains d'avoir accès à des matières fissiles pour les utiliser à des fins prohibées. Si l'on envisage le vol de matières irradiées contenant du plutonium dans un bassin de refroidissement où les matières nucléaires peuvent être stockées, il faut se rappeler que ce combustible est fortement radioactif et ne peut être transporté, sans risque mortel pour les voleurs eux-mêmes, que dans des fûts très lourds et très étudiés pesant des dizaines de tonnes. Pour en extraire le plutonium, il faut traiter le combustible dans une installation de retraitement dont l'existence ne passerait pas inaperçue. Si on considère le lieu de stockage des concentrés du plutonium extrait, ou de l'oxyde de plutonium, de tels lieux sont très bien protégés par des systèmes de verrouillage et d'appareils électroniques qui laisseraient peu de chances à une personne non autorisée d'avoir accès aux matières nucléaires. En outre, les Etats non dotés d'armes nucléaires soumettent presque sans exception les matières fissiles à un système de garanties conçu et appliqué par l'Agence internationale de l'énergie atomique. La comptabilité, les rapports et les inspections que prévoient les accords de garanties de l'AIEA constituent un contrôle supplémentaire des matières fissiles et seules des quantités minimales ne sont pas comptabilisées. Si ce système ne peut à lui seul

empêcher un détournement, il peut en dissuader par le risque d'une prompt découverte.

Le système international de garanties actuellement appliqué par 33 Etats a exigé environ 450 inspections en 1972. De nombreux Etats ont créé leur propre système national de garanties, facilitant ainsi la comptabilité des matières nucléaires. Les possibilités de disparition clandestine et non décelée de matières fissiles à des fins interdites sont très faibles.

Aux enceintes prévues dans la plupart des pays pour se protéger contre la radioactivité à l'extérieur du réacteur on peut substituer la formule souterraine. Les recherches faites à l'occasion des essais souterrains d'armes nucléaires ont montré que la migration des substances solides dans le sol est très lente. Le strontium et le césium qui peuvent être rejetés dans le cas d'un accident de réacteur mettent respectivement 2 500 et 19 000 années pour parcourir un kilomètre. Chaque cas doit être étudié à part cependant et une connaissance parfaite des conditions géologiques est indispensable avant que l'on puisse recommander une construction souterraine. Il faut aussi, bien entendu, prendre en considération les problèmes de coût.

La nécessité d'un emplacement éloigné et de grandes quantités d'eau de refroidissement ont incité à envisager la création d'îles flottantes. Les incidences thermiques sur l'environnement pourraient être ainsi certainement réduites au minimum. En revanche, un accident de réacteur pourrait entraîner le rejet de radioactivité dans la mer et des mesures préventives encore plus strictes que d'habitude devraient être prises.

On ne devrait pas perdre de vue, lorsqu'on choisit l'emplacement des centrales nucléaires, qu'il faudra trouver une solution après la fin de leur durée utile qui est d'environ 30 ans. C'est un problème qui se pose actuellement à l'usine Eurochemic, en Belgique, où les coûts de décontamination et de restauration du site à son état primitif

sont, estime-t-on, comparables à l'investissement initial. Des mesures rationnelles pour la mise hors service et le démontage de centrales nucléaires périmées devraient faire partie intégrante des études initiales. L'arrêt des installations demande non seulement des compétences particulières, mais aussi des engagements de dépenses dont il faut tenir compte dès le début. A la fin de 1973, l'AIEA a réuni un groupe de spécialistes pour étudier ces problèmes. Celui-ci a recommandé de constituer un groupe de travail international qui serait chargé de coordonner les travaux futurs dans ce domaine.

Le maintien de la paix est la condition *sine qua non* d'une large utilisation de l'énergie nucléaire telle qu'on la prévoit actuellement. Une situation dans laquelle des réacteurs de puissance construits en surface seraient la cible d'attaques aériennes aurait des conséquences incalculables, comme l'aurait aussi un combat entre quelques-uns des 100 navires de guerre à propulsion nucléaire.

L'ENVIRONNEMENT

L'utilisation de l'énergie d'origine nucléaire a naturellement certaines conséquences pour l'environnement. Il est manifeste que toute production d'électricité à grande échelle a une influence sur l'environnement. Même la houille blanche n'est pas à l'abri des critiques des «environnementalistes» qui détestent autant la construction de grands barrages que la disparition d'imposantes cataractes. Les centrales thermiques classiques libèrent dans l'atmosphère des gaz de combustion ainsi que des cendres en quantités énormes: une centrale de 350 MW(e) alimentée au charbon rejette environ 75 tonnes d'anhydride sulfureux, 16 tonnes d'oxyde d'azote et 5 tonnes de cendres volantes par jour, sans compter les effets thermiques.

La production d'énergie d'origine nucléaire est une opération qui ménage l'environnement, mais l'emploi généralisé de l'énergie d'origine nucléaire pose également des problèmes. Il est absolument faux de prétendre que tous ont été résolus, mais

actuellement ils ne sont pas insurmontables et plus tard, à la fin du siècle, on trouvera des moyens qui pourront être appliqués à la solution des problèmes qui seront alors d'un autre ordre de grandeur.

Il est normal de commencer par l'extraction de l'uranium. L'uranium se trouve dans la nature avec les produits de sa désintégration, parmi lesquels le radium et le radon. L'extraction entraîne la libération d'aérosols qui contiennent du radon et le rejet de déchets solides qui contiennent de l'oxyde d'uranium et du radium mais * seulement en petites quantités. Le problème de radioprotection le plus sérieux que pose l'énergie atomique est l'exposition des mineurs aux rayonnements. Actuellement, l'exposition admissible pour les mineurs est fixée à un niveau très inférieur à celui qui avait été adopté antérieurement et, dans l'avenir, les risques seront donc considérablement réduits.

La suite du processus de transformation de l'uranium en éléments combustibles ne comprend pas d'opérations affectant l'environnement.

Une des conséquences de l'emploi de nombreuses sources d'énergie autres que l'énergie solaire est le réchauffement de la terre. Malheureusement, les connaissances de l'homme sur les effets à long terme auxquels on peut s'attendre ne sont guère satisfaisantes. Par exemple, on ne sait pas très bien si l'emploi généralisé de combustible fossile entraînera ou non une élévation de la température de la terre. La production d'anhydride carbonique augmentera certainement l'effet de serre et, par conséquent, la température, tandis que la production de poussières pourra réduire l'insolation et avoir ainsi l'effet inverse.

Le rapport entre l'énergie produite par l'homme et l'apport d'énergie solaire était en 1860 de 1 milliardième. Cent ans plus tard, il s'élevait à 1 dix-millième et à la fin du siècle ce rapport sera peut être de 1 trois-millièmes. Il pourrait s'ensuivre une élévation de la température de quelques dixièmes de degré centigrade, ce qui pourrait avoir d'importants effets sur le climat. Ces

problèmes devront donc faire l'objet d'une analyse approfondie en temps opportun.

Il y a toutefois également des effets thermiques locaux et à court terme de la production d'énergie à grande échelle et ces effets sont particulièrement graves au voisinage des parcs nucléaires du type qui a été décrit plus haut. Les centrales d'une puissance d'environ 1 000 MW(e) actuellement en construction auront une influence si elles sont construites au bord de cours d'eau qui ne constituent pas une source froide d'une capacité suffisante. L'autre possibilité, que sont les tours de refroidissement, ne supprime les problèmes écologiques pour les organismes aquatiques que pour poser les mêmes problèmes au niveau de l'atmosphère et du paysage qui ne sera pas embelli par les grandes tours de refroidissement et leurs panaches de vapeur, sans compter les effets micro-climatiques. Pour ce qui est du rejet de l'eau de refroidissement dans les grands lacs ou les océans dans le cas d'installations au large des côtes, il semble tout à fait possible d'aménager les prises et sorties d'eau de manière que les êtres vivants ne subissent pas de dommages.

La question la plus discutée au cours des dernières années et qui préoccupe le plus le public est celle de la production, du stockage et du rejet éventuel de matières radioactives par les centrales nucléaires et leurs installations annexes, notamment les usines de retraitement.

La radioactivité est produite dans les centrales nucléaires sous forme des produits de la fission du noyau d'uranium et sous forme de radioactivité induite dans les matériaux de construction. Plus de 99,9% de toute la radioactivité produite dans les éléments combustibles d'un réacteur de puissance sont confinés jusqu'à ce que le combustible soit traité en vue de la récupération du combustible «non brûlé». Le fluide de refroidissement employé pour extraire la chaleur du cœur du réacteur peut produire une certaine corrosion et érosion des conduites et devenir radioactif. Des gaz radioactifs, tels que le tritium et

le krypton, sont aussi produits dans le réacteur. Il se peut qu'une fraction de ces gaz soit libérée par la centrale, mais la plus grande partie le sera au cours des opérations de retraitement.

La Commission internationale de protection radiologique (CIPR) a fait des recommandations au sujet des concentrations maximales admissibles de différentes substances radioactives dans l'air et dans l'eau. Ces recommandations visent à protéger l'homme contre les effets nuisibles des substances radioactives, que ce soit par irradiation, par inhalation ou par ingestion. En fait, nous en savons plus en ce qui concerne les effets des rayonnements nucléaires sur l'homme que nous n'en savons au sujet de tout autre risque auquel il est exposé. Les recommandations actuelles sont fondées sur les résultats d'un prodigieux effort de recherche en biologie et en écologie. L'objet d'un système de gestion des déchets nucléaires est d'assurer la protection de l'homme et de l'environnement et de maintenir l'exposition très en dessous des limites admissibles. Les méthodes suivies jusqu'à présent consistent soit à diluer la radioactivité jusqu'au point où la dose à l'homme serait très inférieure aux doses maximales admissibles recommandées, soit à la concentrer et à l'isoler. On constate une tendance très nette à abandonner le procédé de dilution en faveur de la concentration suivie du confinement et de l'isolement hors de la biosphère. Il faut aussi faire une distinction entre le traitement provisoire des déchets radioactifs et le stockage à long terme et l'élimination définitive de ces déchets. L'importance accordée à ces méthodes varie selon les pays, mais il semble que l'on ait de plus en plus recours au stockage à long terme, préparant ainsi l'élimination définitive.

Comme il a déjà été indiqué, la libération des substances radioactives contenues dans le combustible nucléaire a lieu principalement dans les usines de retraitement. Actuellement, les usines de retraitement sont en très petit nombre et, selon les prévisions, il y aura moins d'une usine de retraitement pour 30 000 MW(e) de

puissance nucléaire installée, c'est-à-dire qu'en 1980 il n'y aura probablement pas plus de dix usines de retraitement importantes en service. Actuellement, aux Etats-Unis, aucune usine destinée à des fins civiles n'est en service. Une est en cours de transformation, une autre fait l'objet d'essais à froid et une troisième est en construction. En Europe occidentale, l'usine dont la capacité est la plus grande est celle de Windscale, au Royaume-Uni, qui peut traiter plusieurs sortes de combustibles. Du matériel capable de traiter de l'oxyde sera installé à l'usine du Cap de La Hague, en France, qui fonctionnera à l'échelle industrielle et une installation pilote est en service en République fédérale d'Allemagne. L'Inde construit actuellement une usine en se fondant sur l'expérience d'une installation pilote qui fonctionne depuis 1965; la situation est la même au Japon.

Tout ceci pour souligner le petit nombre des usines dont on aura besoin, même à la fin du siècle lorsque la puissance nucléaire installée du monde sera de 3 millions de mégawatts électriques.

Dans les usines de retraitement, il y a libération de déchets radioactifs gazeux sous forme de tritium, de krypton 85 et d'iode 129. Parmi ces gaz, il se peut à la longue que le krypton pose un problème, mais il faut souligner que nous connaissons déjà des méthodes d'extraction et de confinement du krypton qui pourront être employées dans les usines qui seront construites vers la fin du siècle présent. La technique de gestion des déchets utilisée pour les gaz consiste à laisser décroître la radioactivité en stockant les déchets pendant une période assez longue pour permettre une diminution suffisante de l'activité avant rejet dans l'environnement.

Des déchets liquides de basse activité et d'activité intermédiaire sont produits par les usines de retraitement en quantités atteignant plusieurs mètres cubes par jour. Les méthodes employées pour traiter ces déchets varient selon les usines; habituellement, on les stocke un certain temps pour laisser décroître les substances de courte

période, puis on fait subir un traitement chimique, une dilution ou une concentration des différentes fractions.

Les déchets de haute activité résultant de la concentration peuvent être soit stockés sous forme liquide dans des cylindres en acier inoxydable, refroidis et agités, soit transformés en déchets solides. La première méthode est employée à l'usine de Windscale. La seconde est utilisée aux Etats-Unis, en France et dans la République fédérale d'Allemagne. Le produit fini solide peut contenir la substance radioactive soit dans du verre au borate ou au phosphate, soit dans un silicate d'alumine fondu.

Il faudra stocker les déchets de haute activité pendant des milliers d'années ou des périodes plus longues que la durée de tous les systèmes sociaux stables qui ont existé. Il est à noter que la période du plutonium 239 est de 24 000 ans. Si les actinides de longue période (y compris le plutonium) pouvaient être extraits des produits de fission, les déchets restants ne seraient plus dangereux que pendant quelques centaines d'années, au lieu de milliers d'années lorsque les actinides sont présents.

Actuellement, on admet en général, semble-t-il que les déchets de haute activité doivent être stockés de manière à pouvoir les récupérer. Si ce principe est suivi, on pourrait envisager des installations de stockage provisoire qui seront utilisées jusqu'à ce que des solutions aient été trouvées pour l'élimination définitive.

L'usine de Windscale est une installation qui peut traiter aussi bien l'uranium métallique que les oxydes d'uranium. Etant donné que la moitié de l'électricité d'origine nucléaire produite dans le monde jusqu'à présent l'a été dans le Royaume-Uni, l'expérience que ce pays a acquise dans le stockage des déchets de haute activité provenant des quelque 18 000 tonnes de combustibles qu'il a traités présente un intérêt particulier.

Des déchets de haute activité sont stockés à Windscale depuis plus de 20 ans en quantités qui atteignent maintenant 500 m³ et produisent par décroissance une quantité de

chaleur équivalant à 1,5 MW. Ces déchets, actuellement dans des réservoirs relativement petits, pourraient être contenus dans quatre réservoirs du dernier modèle ayant une capacité de 150 m³ et la forme d'un cylindre vertical de 6 mètres de diamètre et de 6 mètres de hauteur. Le réservoir est logé dans une cavité bétonnée dont les parois ont une épaisseur de 1,5 mètre et qui sont partiellement revêtues d'acier inoxydable, formant ainsi un conteneur secondaire. Un circuit de refroidissement amène continuellement de l'eau qui entraîne la chaleur produite par la décroissance des produits de fission, même en cas de panne d'électricité dans le secteur.

L'expérience du fonctionnement de l'installation de concentration par évaporation et de l'installation de stockage a donné entière satisfaction et permet de penser que ces installations pourront continuer à être utilisées pendant plusieurs décennies, mais on admet qu'il s'agit là de mesures provisoires et préparatoires. On estime maintenant que la solidification des déchets offre une meilleure garantie de confinement à long terme. On ne peut envisager l'élimination définitive des déchets tant qu'ils restent sous forme liquide.

L'élimination définitive implique que l'on abandonne toute surveillance des déchets et, par conséquent, tout espoir de les récupérer. Inévitablement, on doit donc avoir la garantie absolue que les déchets ne pourront pas atteindre l'homme pendant une période indéfinie.

Au Royaume-Uni, les déchets seront incorporés à un solide pour lequel la vitesse de lessivage est très petite, et stockés de manière que l'on puisse les récupérer en vue de l'élimination définitive. L'objectif visé est que tous les déchets de haute activité de Windscale soient transformés en solides d'ici à 1995.

Selon la nouvelle réglementation de l'USAEC, la solidification doit se faire dans les cinq ans qui suivent la production des déchets liquides; une fois solidifiés, ces déchets doivent être stockés avant cinq ans dans

un site désigné par le Gouvernement des Etats-Unis.

Les déchets solidifiés de Windscale seront conservés dans des bassins qui feront l'objet d'un contrôle radiologique pour vérifier l'intégrité des conteneurs. En République fédérale d'Allemagne, on considère que le stockage des déchets radioactifs en profondeur dans des mines de sel est la méthode la plus prometteuse et on a choisi à cette fin la mine de sel désaffectée de Asse, dans le Harz, qui doit avoir une capacité suffisante pour contenir tous les déchets radioactifs produits par l'industrie nucléaire de la République fédérale jusqu'en l'an 2000. Pour le moment, seuls les déchets de basse activité et d'activité intermédiaire sont stockés à Asse, mais on se prépare à y stocker aussi des déchets de haute activité à partir de 1976.

A Oak Ridge, aux Etats-Unis, une méthode d'élimination des déchets radioactifs sans possibilité de récupération a été mise au point: on injecte sous haute pression des déchets de basse activité ou d'activité intermédiaire en même temps que du béton dans des couches de schistes rouges à 300 mètres dans le sol. Depuis 1966, 5 000 m³ contenant 5 millions de curies ont été éliminés de cette manière.

Les autres méthodes d'élimination définitive qui ont été suggérées devront faire l'objet de perfectionnements techniques: emploi de fusées pour envoyer les déchets dans l'espace interplanétaire et emploi d'accélérateurs ou de réacteurs à fission ou à fusion pour transformer les substances de longue période en isotopes de période plus courte. Une revue des études sur la gestion des déchets de haute activité, qui a été publiée il y a trois mois pour le compte de l'USAEC, n'exclut pas que ces méthodes puissent être employées à l'avenir, mais souligne la nécessité d'analyser plus en détail les problèmes qui se posent.

Il convient de dire quelques mots sur le tritium, isotope de l'hydrogène dont la période est de 12 ans. Le tritium est produit dans les couches supérieures de l'atmosphère par bombardement de l'azote

par les rayons cosmiques, ce qui donne en permanence une quantité globale de quelque 70 à 140 mégacuries de tritium naturel. On estime qu'à la suite des essais de bombes antérieurs au Traité de Moscou de 1963, environ 7 700 mégacuries ont été libérés dans l'atmosphère. A supposer que l'exécution des programmes nucléaires se poursuive comme à présent, on estime que l'accumulation du tritium produit par fission sera d'environ 600 mégacuries en l'an 2000.

Il faut donc s'attendre qu'au cours des deux prochaines décennies la plus grande partie du tritium de l'environnement sera celui qui aura été produit par les essais d'armes

nucléaires et que la quantité totale diminuera pendant cette période.

Aux Etats-Unis, la dose moyenne annuelle due au rayonnement naturel est de 130 millirems, à quoi il faut ajouter 114 millirems par an et par habitant provenant des rayonnements artificiels dont 90% sont d'origine médicale (diagnostic, thérapie, etc.). L'exploitation des centrales nucléaires en 1971 a été la cause d'une exposition minimale de la population totale égale à 0,003 millirem. Même si l'on centuplait la production d'énergie d'origine nucléaire, cela n'entraînerait pas une augmentation importante de l'exposition totale.

Pour conclure succinctement:

- Il faudra de très grandes quantités d'énergie supplémentaires pour maintenir la qualité de la vie, tant en raison de l'augmentation de la population que de la nécessité d'employer plus d'énergie pour extraire les matières premières indispensables.
- Parmi les différentes solutions possibles, seule l'énergie de fission est actuellement prête, tant du point de vue technique que du point de vue économique, à contribuer immédiatement à l'approvisionnement du monde en énergie. Parmi les diverses sources d'énergie, la part relative de l'énergie d'origine nucléaire augmentera.
- Les réacteurs de puissance que l'on peut commander à l'heure actuelle se sont révélés d'une exploitation très sûre et d'une fiabilité remarquable. Il faut s'attendre que, l'expérience du fonctionnement aidant, les futurs réacteurs de ces filières seront encore plus sûrs et plus fiables.
- Des méthodes connues et éprouvées permettront de conserver les déchets radioactifs produits pendant la prochaine décennie et de les isoler pour protéger l'environnement à un prix qui sera inférieur à 1% du coût du kilowatt-heure. Les quantités plus grandes de déchets radioactifs qui seront produites à partir du milieu de la prochaine décennie pourront être stockées dans des conditions qui permettront leur récupération à un petit nombre (peut-être une trentaine) d'emplacements répartis dans le monde et par des procédés dont la mise au point est en cours. Des échanges de vues ont déjà eu lieu, sous les auspices de l'Agence au sujet de l'emplacement de sites de stockage internationaux. Il se peut que les résultats de nouveaux travaux de recherche permettent de réduire la durée de stockage à quelques centaines d'années au lieu de milliers.
- L'énergie d'origine nucléaire est pour nous le moyen de garantir nos approvisionnements en énergie en attendant que de nouvelles sources puissent être exploitées et, si elle est planifiée et contrôlée avec soin comme cela a été le cas jusqu'à présent, elle ne présente pas de risques inacceptables pour l'environnement.