

Les effets écologiques de l'énergie d'origine nucléaire

par Essam E. El-Hinnawi

L'énergie est sans conteste l'un des éléments essentiels qui permettent de répondre aux besoins fondamentaux de l'être humain et de stimuler et de maintenir la croissance économique, ainsi que le niveau de vie, à tel point que les pays mesurent souvent leur bien-être à leur boulimie d'énergie. Les statistiques établissent que la consommation mondiale d'énergie a augmenté de près de 50% en moins de dix ans [1]. On estime que la consommation d'énergie par habitant a plus ou moins doublé au cours des trente dernières années et les tendances actuellement observées laissent augurer un rythme de croissance plus rapide encore dans l'avenir. Cette augmentation est la conséquence normale du développement des activités socio-économiques et de l'élévation du niveau de vie.

Jusqu'à notre époque, l'humanité a fait face à l'expansion de la demande d'énergie par un recours accru aux combustibles fossiles et à l'énergie hydro-électrique. L'énergie nucléaire est apparue sur le marché il y a une vingtaine d'années et satisfait actuellement une partie des besoins d'énergie électrique. En 1976, les 187 réacteurs de puissance exploités dans 19 pays représentaient une puissance nucléo-électrique installée de 79,9 GW(e) [2].

Le tableau I expose succinctement les plus récentes estimations de la puissance nucléaire installée que l'on peut envisager pour la fin du vingtième siècle. Les chiffres indiqués révèlent, particulièrement pour la période postérieure à 1985, des écarts sensibles qui reflètent d'éventuelles modifications du taux de croissance de l'activité économique et diverses autres considérations susceptibles d'agir sur le rythme des mises en service de centrales nucléaires. Si l'on s'en tient aux prévisions de l'AIEA, le secteur nucléaire représentera, pour le monde entier, 11 à 13% de la puissance électrique installée en 1985 et 17 à 20% en l'an 2000.

Au niveau local et, parfois même, régional, les conséquences écologiques de la production et de l'emploi de l'énergie revêtent désormais une importance considérable et sont perçues comme le présage d'un risque de plus grande ampleur faute d'une attention suffisante. Diverses études récentes de l'impact écologique de l'énergie démontrent l'interdépendance des différents pays dans ce domaine, puisque le fait d'un Etat peut causer des dommages écologiques à ses voisins. Parallèlement, une opinion publique mieux éclairée fait pression en faveur d'un examen rationnel des risques pour le milieu à l'ère de l'énergie. Bien qu'au contraire des centrales thermiques à combustible fossile les centrales nucléaires ne rejettent ni cendres ni gaz nocifs dans l'atmosphère, la radioactivité émise par les produits de la fission nucléaire cristallise les craintes du public devant l'expansion du secteur nucléaire en dépit de précautions et de mesures de contrôle drastiques. On s'est efforcé d'ailleurs de déterminer des niveaux de radioactivité acceptables pour le milieu ou pour l'homme et, bien que les recommandations de la CIPR soient généralement appliquées pour l'évaluation des risques professionnels, leur généralisation à des populations nombreuses et à l'ensemble du milieu est largement controversée.

EFFETS ECOLOGIQUES DU CYCLE DU COMBUSTIBLE NUCLEAIRE

Le type de réacteur le plus fréquent à l'heure actuelle utilise un combustible à l'oxyde d'uranium enrichi et l'eau comme modérateur et comme fluide de refroidissement. Selon les cas, l'eau est vaporisée directement dans le réacteur (réacteur à eau bouillante) ou communique sa chaleur à un générateur de vapeur externe (réacteur à eau sous pression). Outre les réacteurs à eau légère, on a mis au point d'autres types qui emploient le plus souvent le graphite ou l'eau lourde (D_2O) comme modérateur. Parmi les installations expérimentales et les prototypes, on peut mentionner le réacteur de recyclage du plutonium, dans lequel le combustible est constitué en partie ou en totalité par du plutonium, et le réacteur surgénérateur rapide (tel que le réacteur surgénérateur rapide refroidi par un métal liquide) dont le combustible est un mélange d'oxyde de plutonium et d'oxyde d'uranium naturel ou appauvri. Ce dernier type de réacteur est conçu pour produire une quantité de matières fissiles, utilisables comme combustible de réacteur, supérieure à celle qu'il consomme.

L'expression "cycle du combustible nucléaire" désigne l'ensemble des activités qui vont de l'extraction et du traitement de l'uranium à la gestion des déchets produits à tous les stades du cycle, en passant par la fabrication des éléments combustibles destinés aux réacteurs, le transport et le retraitement du combustible irradié. Le présent article examine les effets écologiques de ces diverses activités.

Extraction et traitement de l'uranium

En 1975, la production d'uranium a été d'environ 26 000 tonnes et l'on prévoit qu'elle atteindra 40 000 tonnes en 1980 [4, 6, 7 et 8]. Selon les projections actuelles, la demande d'uranium à bon marché excédera la capacité de production d'uranium avant 1985. On estime que les besoins totaux d'uranium représenteront 800 000 tonnes à 1 million de tonnes en 1990 et 2 à 3 millions de tonnes en l'an 2000 [6, 8]. L'opinion des spécialistes diverge à l'heure actuelle quant à savoir s'il existe effectivement une telle quantité d'uranium à bon marché dans la partie supérieure de l'écorce terrestre d'où il serait possible de l'extraire dans des conditions économiques. La satisfaction des besoins croissants de l'industrie nucléaire semble en toute hypothèse appeler nécessairement l'intensification de la prospection et de l'exploitation de ressources nouvelles [6, 9].¹

Selon les caractéristiques géologiques du gisement, l'exploitation du minerai d'uranium se fait dans des mines souterraines, à ciel ouvert ou par injection d'eau. La consommation d'une centrale nucléaire dotée d'un réacteur à eau légère de 1000 MW(e) représente 50 000 à 80 000 tonnes de minerai d'uranium (d'une teneur de 0,2%). Au cours des 30 ans de durée de vie utile d'une telle installation il faut donc extraire environ 1,5 million de tonnes de minerai, soit 1,2 million de mètres cubes au lieu de 60 millions de mètres cubes de charbon pour une centrale thermique au charbon de puissance analogue [10].

Tableau I: Prévisions de la puissance nucléaire installée (en GW(e)) pour les années 1985 et 2000

Année	OCDE [3]	AEN-OCDE/ AIEA [4]	USERDA [5]	AIEA [6]
1985	538–700	479–530	390–488	350–400
2000	2800–4100	2005–2480	1695–2250	1500–1800

¹ Il en va de même pour les autres matières utiles à l'industrie nucléaire, (tels que le zirconium, le bore, le cadmium, le graphite, par exemple). Seule une saine gestion de ces ressources peut permettre de satisfaire les besoins croissants des industries nucléaire et autres.

Les conséquences écologiques de l'extraction de l'uranium peuvent se diviser comme suit: les conséquences pour les milieux terrestre et aquatique (du fait des déblais et des eaux rejetées par le système de drainage de la mine ou employées pour l'abattage), d'une part; les affections professionnelles, de l'autre. On estime ainsi que le radon résultant de la décroissance radioactive du radium 226 présent dans les minerais est le principal responsable de la fréquence anormalement élevée du cancer chez les mineurs d'uranium [11 à 14]. L'exposition est en principe atténuée au moyen d'une ventilation naturelle ou artificielle et maintenue en deçà de la concentration maximale admissible en radon, tandis que l'on cherche également à limiter l'empoussiérage provoqué par les opérations d'extraction, afin d'éviter l'exposition à des concentrations de silice et à des niveaux de rayonnement dangereux.

Il convient d'observer que les conséquences écologiques et les risques sanitaires professionnels caractéristiques de l'extraction du charbon (pour l'exploitation d'une centrale de 1000 MW(e)) tendent à être plus considérables que les conséquences et les risques correspondants liés à l'extraction de l'uranium (pour l'exploitation d'une centrale de même puissance). Le nombre des décès par accident à la mine est trois fois plus grand pour une centrale au charbon que pour une centrale nucléaire [15]. Les décès dus à des facteurs d'ambiance sont beaucoup plus fréquents parmi les mineurs de charbon (pneumoconiose) que parmi les mineurs de l'industrie de l'uranium.

Près de 70% de toute la radioactivité contenue dans le minerai extrait demeurent intacts dans les déchets solides des opérations de traitement [16]. Parmi les effets des amoncellements de déchets on peut citer: le transport de poussière par érosion éolienne vers des zones d'accès libre; la pollution des cours d'eau provoquée par les terrils proches des rives ou par la lixiviation du radium par les eaux de crues; la percolation des eaux à travers les déchets amoncelés jusqu'aux nappes souterraines [17]. Diverses études [17 à 22] ont démontré la nécessité de protéger les terrils de l'érosion du vent et des eaux pendant de très longues durées (correspondant à la période du radium 226 qui est de 1620 ans). Par ailleurs, les émanations de radon auxquelles donne lieu le radium contenu dans les déchets de traitement interdit l'emploi de ces derniers comme matériaux de construction ou de remblai pour l'édification de bâtiments à usage d'habitation et exclut de même l'implantation de tels bâtiments au voisinage des déchets.

Fabrication du combustible

Au stade de la fabrication du combustible, le risque majeur est lié à la toxicité du fluorure d'hydrogène et du fluore servant à la production d'hexafluorure d'uranium. Les précautions à prendre pour la manipulation de ces produits sont toutefois d'application constante dans l'industrie chimique du fluore. L' UF_6 produit est utilisé dans les usines d'enrichissement sous la forme d'un gaz extrêmement corrosif mais, à température normale, il se présente à l'état solide et peut être emballé en toute sécurité dans des cylindres d'acier. Parvenues au point de déchargement après accomplissement des opérations de transformation en UF_6 , les matières qui parcourent le cycle du combustible pénètrent dans le champ d'application du système de garanties établi par l'AIEA dans le cadre du Traité sur la non-prolifération. A partir de ce moment, les matières nucléaires soumises aux garanties doivent être comptabilisées physiquement avec une grande précision aux différentes étapes du cycle.

Le risque de rapprochement accidentel de quantités de ^{235}U suffisantes pour déclencher une réaction en chaîne s'élève parallèlement au degré d'enrichissement de l'uranium. Bien que la probabilité des accidents de criticité soit très faible, il convient de ne négliger aucun soin pour prévenir tout événement de ce type. Les résidus d'uranium appauvri provenant des installations d'enrichissement sont normalement stockés en vue de leur éventuelle utilisation comme composants fertiles du combustible des réacteurs. Ces matières sont légèrement

radioactives mais produisent peu à peu les nucléides ^{226}Ra et ^{222}Rn qui sont beaucoup plus dangereux. La production de ces nucléides est toutefois très lente et l'imposition de restrictions à l'entrée dans la zone de stockage est une garantie contre les risques d'irradiation par les déchets.

La production d'éléments combustibles au dioxyde d'uranium est désormais courante et les méthodes appliquées paraissent exemptes de risques appréciables. La fabrication du combustible à mélange d'oxyde est, cependant, beaucoup plus complexe. Les risques qu'elle comporte sont dus à la toxicité du plutonium et au fait que la "masse critique" du dioxyde de plutonium, nécessaire pour déclencher des réactions de fission en chaîne, n'est que de quelques kilogrammes. Les risques normaux liés à la production de combustibles à mélange d'oxydes sont néanmoins assez faciles à conjurer.

Exploitation d'un réacteur

L'exploitation normale d'un réacteur nucléaire provoque l'apparition de produits de fission et d'activation radioactifs. La plus grande partie de ces matières radioactives est retenue à l'intérieur des éléments combustibles. Les radionucléides qui se dispersent ou se forment dans le fluide de refroidissement sont récupérés par les dispositifs de traitement des déchets gazeux et liquides. Les rejets d'effluents de faible activité qui se produisent en cours d'exploitation normale sont étroitement réglementés et maintenus en-deçà des limites autorisées.

Les rejets radioactifs des réacteurs varient selon le type de réacteur et le système de traitement des déchets utilisé. Les radionucléides rejetés avec les effluents gazeux se composent essentiellement des corps ci-après: des gaz nobles (^{133}Xe), des gaz d'activation (^{41}Ar , ^{14}C , ^{16}N et ^{35}S), de la vapeur de tritium et du tritium gazeux, des halogènes et des matières particulaires. Les rejets de ^{14}C correspondent à un débit de dose très faible mais, comme il s'agit d'un corps de longue période (5730 ans), elles n'en contribuent pas moins notablement à la dose collective [23 à 26]. De même, les rejets de tritium de plus en plus abondants (principalement sous forme d'eau tritiée — HTO) requièrent l'étude précise et l'évaluation périodique de leurs conséquences écologiques et, notamment, de l'exposition chronique à des niveaux très faibles [27]. Les rejets sous forme d'effluents liquides contiennent du tritium, du ^{137}Cs , du ^{134}Cs , du ^{131}I , du ^{133}I , du ^{58}Co et du ^{60}Co , ainsi que de nombreux produits de corrosion activés tels que le ^{51}Cr et le ^{51}Mn qui sont particulièrement abondants dans les effluents liquides des réacteurs à eau légère.

Par rapport aux risques résultant des rejets gazeux des centrales électriques à combustible fossile, les risques que comportent les rejets des centrales nucléaires en cours d'exploitation normale sont d'un ordre de grandeur négligeable. On estime toutefois que la pollution thermique est plus grande dans le cas des centrales nucléaires que dans celui des centrales à combustible fossile. Les premières rejettent l'essentiel de leur chaleur résiduelle dans l'eau de refroidissement, tandis que les secondes rejettent près de 15% de la chaleur avec les produits de combustion par la cheminée [28]. En d'autres termes, les rejets de chaleur résiduelle d'une centrale nucléaire dans les eaux réceptrices sont supérieurs de près de 50% à ceux d'une centrale à combustible fossile produisant la même quantité d'électricité.

L'opinion publique a surtout retenu le risque d'un accident qui entraînerait le rejet d'une quantité de radioactivité considérable dans l'environnement immédiat. Divers types d'accidents peuvent, certes, survenir au cours de l'exploitation d'un réacteur nucléaire, mais un réacteur est doté dès sa conception de nombreux dispositifs de sûreté associés à des schémas d'opérations qui doivent assurer l'arrêt automatique du réacteur en cas d'incident grave. En outre, la plupart des réacteurs de puissance sont entourés d'une enceinte de confinement

censée retenir l'essentiel de la radioactivité qui risque de se dégager en cas d'accident grave. L'efficacité de ces mesures de sûreté (et en particulier celle du système de refroidissement de secours du cœur) fait cependant l'objet de certaines critiques [13, 29, 30, 31].

On s'est efforcé de déterminer la probabilité d'un grave accident de réacteur nucléaire à partir des renseignements disponibles sur le taux de défaillance des divers composants techniques du réacteur. Selon l'étude la plus récente [32], généralement connue sous le nom de Rapport Rasmussen, un accident de fusion du cœur dans un réacteur à eau légère a une probabilité d'environ 1/20 000 par réacteur par an et, sur 100 accidents de fusion du cœur, 99 ne provoqueraient aucun décès immédiat. Selon la même source, un accident de fusion du cœur sur 170 causerait plus de dix décès immédiats et, sur 500 accidents de ce type, un seul en causerait plus de cent. Cette étude est toutefois à l'origine d'une controverse vaste et complexe. On a ainsi contesté la valeur des méthodes employées, l'estimation des risques d'accident et la place faite à l'erreur humaine (voir, par exemple, les références 33, 34 et 35). D'autres détracteurs critiquent, pour leur part, l'attention insuffisante accordée aux risques liés à des phénomènes naturels (tels que les ouragans ou les tremblements de terre), aux sabotages intentionnels ou aux faits de guerre.

Un accident survenant dans un réacteur surgénérateur rapide pourrait avoir des conséquences plus graves qu'un accident de réacteur à eau légère. Le risque majeur est associé à la possibilité théorique que la fusion du cœur d'un surgénérateur rapide donne à ses éléments une configuration critique. On estime en outre que ce type de réacteur est plus particulièrement dangereux dans la mesure où il utilise le sodium comme fluide caloporteur et où la densité de l'énergie est plus élevée, le flux de neutrons plus puissant et la température de fonctionnement plus haute.

En toute hypothèse, les conséquences d'un grave accident dépendraient à la fois de la quantité de radioactivité rejetée dans l'environnement et de nombreux autres facteurs tels, par exemple, l'âge moyen des produits de fission, la proportion d'actinides présents, les modalités du rejet (dans l'atmosphère, dans un cours d'eau, etc.), les conditions météorologiques, la densité de peuplement de la région et la rapidité des mesures d'intervention. De plus, il est malaisé d'apprécier les conséquences écologiques qu'aurait un grave accident de réacteur puisqu'il ne s'en est encore jamais produit et que la probabilité d'un tel événement est jugée très faible.

Le démantèlement complet d'une centrale nucléaire après son arrêt définitif (soit après 20 à 30 ans de service) sera, d'autre part, une tâche délicate et lourde de risques en raison de la contamination radioactive des éléments de structure du réacteur tout au long de la période de fonctionnement. Le bombardement neutronique des matériaux qui entrent dans la composition d'un réacteur produit tout un ensemble de radionucléides dont certains émettent des rayonnements gamma dotés d'un grand pouvoir de pénétration et ayant une période de plusieurs années. L'expérience acquise à l'occasion du démantèlement de réacteurs de faible puissance autorise néanmoins un certain optimisme quant à la possibilité d'éliminer totalement les réacteurs de puissance après leur arrêt définitif. Les conséquences écologiques de cette opération demeurent toutefois très insuffisamment connues.

Retraitement du combustible

Les éléments combustibles qui sont extraits du réacteur lors du rechargement constituent les matières les plus intensément radioactives dans le cycle du combustible. Le principal risque résulte de l'énorme quantité de rayonnements gamma émise par la décroissance des produits de fission radioactifs. Les éléments épuisés sont déposés dans de profonds réservoirs d'eau, appelés piscines de refroidissement, et y demeurent quelque temps. Ils doivent

yl être disposés de manière judicieuse afin que la quantité considérable de matières fissiles présentes – sous forme de ^{235}U et du Pu – ne puisse prendre une configuration critique. Au bout de quelques mois, les produits de fission de courte période ont déchu jusqu'à des niveaux d'activité faibles et le combustible peut être retraité.

Les stocks d'éléments combustibles épuisés augmentent rapidement et cette évolution se maintiendra de toute évidence pendant un certain temps. Or, si les piscines de refroidissement offrent un moyen de stockage satisfaisant pour le court terme, elles ne peuvent bien entendu pas jouer le rôle d'un lieu de stockage permanent du combustible épuisé: elles nécessitent une surveillance continue et, nonobstant la diminution de la radioactivité au cours du stockage, les actinides présents dans les éléments épuisés restent dangereusement radioactifs pendant des centaines de milliers d'années. Dans une usines de retraitement, le combustible épuisé est dissous par des procédés chimiques pour permettre la récupération des résidus de matières combustibles. Au cours de cette opération, une forte proportion des produits de fission ainsi que les produits radioactifs qui se sont formés dans la gaine du combustible sont transformés en déchets solides et liquides. A l'heure actuelle, les usines de retraitement du combustible sont la principale source de contamination radioactive du milieu par l'industrie nucléaire.

Au cours des opérations de retraitement, les produits de fission gazeux contenus dans les éléments combustibles, principalement du ^{85}Kr et du ^{129}I , s'échappent des pastilles de combustible. Il se dégage également du tritium et des composés volatiles de ^{14}C . Les effluents gazeux sont épurés d'une grande proportion d'éléments radioactifs, mais le ^{85}Kr (de période 10,8 ans) et le tritium (de période 12,3 ans) sont actuellement libérés dans l'atmosphère. Il est à peu près certain que si l'on veut respecter les normes de radioprotection en vigueur tout en procédant à un retraitement en masse des combustibles oxydes, les rejets des cheminées devront être purifiés de la quasi-totalité de ces deux gaz.

Le retraitement produit en outre des déchets liquides de basse activité finalement rejetés dans le milieu. En général, la majeure partie de la petite quantité de tritium libérée passe dans ces effluents. Il s'impose d'améliorer les méthodes de stockage ou d'élimination de ces déchets. Les usines de retraitement produisent d'autre part des déchets solides d'activité intermédiaire et de basse activité. Le retraitement du combustible consommé en une année de fonctionnement par un réacteur à eau légère de 1000 MW(e) engendre 20 à 60 m³ de déchets de ce type. Les déchets solides d'activité intermédiaire sont constitués principalement par les matériaux de gainage du combustible; le degré de radioactivité de ces matériaux dépend de leur composition et de l'irradiation qu'ils ont subie. Ils sont contaminés par de petites quantités de combustible épuisé. Le plus couramment, les déchets de ce type sont enterrés ou placés dans des fûts et immergés en mer. A l'heure actuelle, l'AEN/OCDE supervise l'élimination de 7000 tonnes par an dans l'océan Atlantique à une profondeur de 4500 m [36, 37]. L'élimination se fait aussi par enfouissement profond dans des mines désaffectées ou dans des formations géologiques adéquates [38, 39].

On estime que le volume des déchets de haute activité issus du retraitement du combustible épuisé atteindra 20 000 m³ en 1990 [22]. Ces déchets contiennent plus de 99% des produits de fission présents dans le combustible, ainsi que des actinides en moindre quantité. A l'heure actuelle, ils sont le plus souvent stockés sous forme liquide et certains de leurs constituants demeureront dangereusement radioactifs pendant plusieurs centaines de milliers d'années. Il n'existe pas aujourd'hui de méthode universellement reconnue pour stocker les déchets de haute activité en état d'isolement continu et dans des conditions de sûreté satisfaisantes sur de très longues périodes. On dispose toutefois de procédés de transformation de ces déchets en solides relativement inertes [22]. On considère que la solution consistera vraisemblablement à éliminer les déchets solides de haute activité en les déposant dans des formations géologiques stables; il reste toutefois à en établir la faisabilité. D'autre part,

Tableau II: Projection du nombre des transports au cours du cycle du combustible jusqu'à l'an 2000 [40]

	Transports par an en		
	1980	1990	2000
Combustible	670	2500	5 400
Combustible épuisé	2000	6400	12 000
Plutonium	20	143	438
Déchets et produits de fission	630	2450	5 500

il n'est nullement certain que les méthodes et les sites d'élimination préconisés constituent une garantie absolue contre tout dégagement de radioactivité en cas de bouleversement d'origine naturelle ou humaine.

L'élimination des déchets radioactifs de haute activité en milieu marin est sévèrement limitée en vertu de conventions internationales et régionales qui lient de nombreux pays dotés d'une industrie nucléaire. De même, un traité interdit l'élimination dans l'Antarctique.

Transport de matières radioactives

Le transport des matières radioactives dans des conditions de sûreté satisfaisantes est l'un des aspects importants de l'activité nucléaire. Les installations du cycle du combustible nucléaire sont généralement disséminées dans l'espace, même à l'intérieur d'un pays donné, et il est donc nécessaire de transporter de l'une à l'autre des matières radioactives sous des formes diverses. Le volume des matières radioactives transportées a augmenté et continuera d'augmenter à mesure de l'expansion de l'industrie nucléaire. Les matières radioactives qui parcourent le cycle du combustible empruntent généralement les moyens de transport de surface, qu'il s'agisse de la route, du rail ou de la mer. L'avion sert couramment au transport de faibles quantités destinées au secteur médical ou à celui de la recherche. Le tableau II contient des projections du nombre de transports prévus au cours du cycle du combustible nucléaire aux Etats Unis d'Amérique (pour les réacteurs à eau légère, les réacteurs à haute température refroidis par un gaz et les réacteurs surgénérateurs rapides refroidis par un métal liquide).

Il est peu probable que le transport de minerai radioactif entre la mine et l'usine de traitement engendre des effets écologiques appréciables, même en cas d'accident. De même, le transport du produit traité, c'est-à-dire du concentré d'uranium, et le transport ultérieur de l' UF_6 et de l' UO_2 dans des conteneurs spéciaux ne doivent normalement pas avoir de conséquences écologiques.

Les éléments combustibles sont transportés dans des emballages conçus pour éviter toute criticité, même en cas d'accident grave. En situation normale, la radioactivité du combustible neuf ne peut en principe produire aucun effet sur le milieu et ne peut exercer qu'un effet très restreint sur les travailleurs qui participent au transport. Même en cas d'accident, les propriétés physiques et le faible niveau d'activité massique du combustible limiteraient l'irradiation à des niveaux très faibles. En théorie, cependant, la criticité accidentelle peut provoquer d'importants dégâts écologiques. Des équivalents de dose à l'individu supérieurs à 500 rem peuvent se produire à proximité immédiate et il faudrait procéder à une décon-

tamination approfondie et certainement onéreuse des alentours. Le risque d'atteindre la criticité en cours de transport est toutefois quasiment supprimé grâce à des contrôles stricts et à des normes d'application obligatoire pour la conception des conteneurs.

Les éléments combustibles épuisés sont transportés dans des châteaux blindés refroidis par l'air ou par l'eau, d'un poids souvent supérieur à 20 tonnes. L'épais blindage des châteaux doit limiter le rayonnement des éléments combustibles qu'ils renferment à des niveaux fixés par les règlements de l'AIEA et, s'il en va différemment, les châteaux doivent être acheminés avec des précautions spéciales. Dans des conditions de transport normales, le niveau de rayonnement autour des conteneurs doit être limité de telle manière que l'irradiation des travailleurs qui participent aux opérations soit maintenue en deçà des valeurs maximales admissibles. Lorsque des travailleurs manipulent des quantités considérables de colis, il peut être nécessaire de procéder à des contrôles particuliers et d'appliquer des mesures de prévention supplémentaires telles que la rotation des postes. Un grave accident qui provoquerait la rupture des parois du château et en libérerait le contenu pourrait avoir des conséquences dramatiques pour la population et pour le milieu, mais le risque d'une telle rupture est limité à un minimum par le respect rigoureux des exigences réglementaires en matière de conception, de fabrication, d'essais et d'homologation des châteaux.

Les déchets radioactifs de faible activité sont placés dans des conteneurs scellés, tels que des fûts d'acier de 200 litres, et sont acheminés jusqu'aux sites d'enfouissement par des entreprises de transport. Les déchets radioactifs de haut niveau seront transportés, après solidification, jusqu'aux sites de stockage provisoire tels que des formations géologiques adéquates, de mines de sel ou des installations de stockage en surface, dans des conteneurs semblables aux châteaux de transport du combustible épuisé.

L'emballage et le transport des matières radioactives font l'objet de règlements de transport internationaux et nationaux. L'AIEA a publié un règlement de transport des matières radioactives qui a été adopté par la quasi-totalité des autorités responsables des transports internationaux et retenu par la plupart des Etats Membres pour servir de base à leur propre réglementation. L'AIEA s'attache à adapter continuellement son règlement de transport des matières radioactives à l'évolution des techniques et veille à en promouvoir l'adoption et l'application.

La question du plutonium

Le plutonium 239 (qui n'est pas séparable des autres isotopes du plutonium) est l'isotope le plus inquiétant; c'est celui que l'on utilise dans les bombes atomiques et il constitue au moins 70% de la quantité totale de plutonium produite dans les réacteurs de puissance. Sa période est de 24 400 ans. Il est incontestable qu'un vaste programme nucléo-électrique mondial entraînerait la production et nécessiterait le traitement de quantités de plutonium relativement importantes, particulièrement si les réacteurs surgénérateurs rapides se multipliaient. A l'heure actuelle, la production annuelle est d'une vingtaine de tonnes qui restent enfermées, pour l'essentiel, dans les barres de combustible épuisé non traité. D'ici l'an 2000, la production annuelle pourrait atteindre plusieurs centaines de tonnes.

Pour déclencher une réaction en chaîne, il suffit de quelque 6 kg de plutonium 239 métal, d'environ 9 kg de PuO₂ ou d'une masse légèrement plus élevée de plutonium de réacteur contenant divers isotopes de cet élément. Il n'est pas impossible qu'une masse suffisante de plutonium de réacteur se trouve réunie accidentellement, par exemple au cours des opérations de retraitement ou de fabrication du combustible, et que se produise une réaction en chaîne provoquant l'émission d'une quantité de rayonnement mortelle et la dispersion, éventuellement violente, du plutonium. Des mesures de contrôle strictes sont appliquées régulièrement et ont toujours été efficaces jusqu'à présent.

La toxicité et les effets carcinogènes du plutonium sont au centre d'une vaste controverse [voir, par exemple, les références 41, 42 et 43]. Le plutonium est fortement toxique; sa toxicité absolue est comparable à celle des toxines connues en biologie [43]. Ces dernières sont toutefois instables comme la plupart des protéines; par ébullition en solution, on fait disparaître leur activité en quelques minutes. Au contraire, le plutonium demeure dangereux pendant un laps de temps pouvant atteindre 20 fois sa période, c'est-à-dire près d'un demi-million d'années. A la différence des toxines, le plutonium agit lentement; la présence d'une faible dose carcinogène dans les poumons peut ne pas provoquer de cancer pendant 10, 20 ou 40 ans. (Certains polluants ont eux aussi de longues périodes de latence et perdent difficilement leur virulence.) Aussi plusieurs auteurs ont-ils réclamé une révision de la dose maximale admissible de 40 nCi de plutonium 239, définie par la CIPR.

GARANTIES NUCLEAIRES ET PROTECTION DU MILIEU

La vigilance et les précautions les plus sévères doivent s'appliquer aux niveaux national et international tout au long du cycle du combustible nucléaire et, notamment, lors du transport des matières nucléaires, de façon à éviter que de telles matières tombent en la possession de personnes qui risqueraient de les employer à des fins illicites et de causer ainsi des dommages à la population ou au milieu. Un effort considérable est donc nécessaire aux niveaux national et international pour éviter tout détournement de matières et tout sabotage d'installations nucléaires.

La responsabilité d'établir et de faire respecter un système de protection physique au niveau national incombe essentiellement à chaque gouvernement; les modalités d'application concrètes sont, bien entendu, liées au système national de comptabilité, de garanties et de contrôle des matières nucléaires. Le dispositif doit s'appliquer aux matières nucléaires en cours d'utilisation, de stockage et de transport dans l'ensemble du cycle du combustible aux niveaux national et international. A cet égard, l'AIEA a mis sur pied un système international de garanties nucléaires dont elle assure le fonctionnement.

Le mécanisme établi en application du Traité sur la non-prolifération (TNP) est le plus universel et semble le plus efficace à bien des égards. On peut toutefois résumer comme suit les principales carences des systèmes de garanties actuellement en vigueur qui laissent place à certains risques écologiques: un grand nombre d'Etats ne sont pas parties au TNP; les garanties ne peuvent prévenir le transfert aux applications militaires des connaissances technologiques acquises par le secteur nucléaire civil; le fait que de nombreuses installations nucléaires échappent à toutes garanties; les lacunes des accords de garanties quant à leur application aux explosions nucléaires à des fins pacifiques, aux matières destinées à des utilisations militaires autres que les explosions et à la rétrocession des matières à un Etat tiers; l'absence de garanties concrètes pour les matières brutes; les difficultés pratiques d'un contrôle efficace des stocks nucléaires; la facilité avec laquelle les Etats peuvent se dégager des obligations du TNP et de la plupart des accords de garanties étrangers au TNP; les insuffisances des méthodes de comptabilité et des dispositifs d'alerte; l'absence, enfin, de sanctions réellement susceptibles d'empêcher le détournement de matières soumises aux garanties.

On ne saurait en outre ignorer l'éventualité d'un détournement de matières nucléaires par un groupe terroriste et le risque de voir se multiplier les occasions et les motifs de chantage nucléaire.

On a assisté ces dernières années au renforcement des moyens de prévenir les vols de matières nucléaires et les attentats contre les installations nucléaires. Ces mesures sont certes opportunes car les risques sont réels et tendront à s'accroître à mesure que la technologie nucléaire se répandra dans le monde.

CONCLUSIONS

Le tableau III contient une comparaison entre les effets écologiques d'une centrale au charbon de 1000 MW(e) et ceux de trois types de centrales nucléaires de même puissance. Les avantages des réacteurs pour le respect du milieu se manifestent de la manière suivante: tout d'abord, à la rubrique "Effluents", puisque les réacteurs en produisent 1200 à 1500 tonnes par an, par comparaison au million de tonnes de polluants atmosphériques produits par les centrales au charbon; ensuite, pour la préservation du sol, puisque, d'une part, une centrale au charbon occupe 120 à 160 hectares, alors qu'une centrale nucléaire n'exige que 30 à 60 hectares, et que, d'autre part, l'alimentation d'une centrale au charbon nécessite l'excavation de 80 hectares par an, alors que l'extraction de l'uranium nécessaire à un réacteur à eau légère bouillante requiert l'excavation de cinq hectares et que celle de l'uranium nécessaire à un réacteur surgénérateur rapide refroidi par un métal liquide exige l'excavation d'une fraction d'hectare seulement. Les besoins en eau de refroidissement sont sensiblement équivalents pour un réacteur surgénérateur rapide refroidi par un métal

Tableau III: Effets d'une centrale de 1000 MW(e) sur le milieu [44]

Type	Centrale thermique au charbon	Réacteur à eau légère bouillante	Réacteur à haute température refroidi par un gaz	Réacteur surgénérateur rapide refroidi par un métal liquide
THERMIQUES				
J/s à disperser	$1,57 \times 10^9$	$2,03 \times 10^9$	$1,51 \times 10^9$	$1,38 \times 10^9$
EFFLUENTS				
Radioactivité (10^3 Ci/an)	—	2253	2	2
POLLUTION ATMOSPHERIQUE (t/an)				
SO ₂	45 000	1500 ^a	1200 ^a	—
NO _x	26 000	900	700	—
CO	750	25	20	—
Matières particulaires	3 500	120	95	—
HC	260	9	7	—
DECHETS (m³/an)				
radioactifs	—	340	280	230
cendres	5 700	200 ^a	140 ^a	—
SOL				
Excavations minières (hectares)	80	5	4	0,02
Site de la centrale (hectares)	120 à 160	← 30 à 60 →		

^a Les émissions imputées aux réacteurs sont calculées en considération de l'énergie électrique nécessaire à l'enrichissement

liquide et pour une centrale au charbon, mais plus élevés de 40 à 50% pour un réacteur à eau légère bouillante. Toutefois, la nocivité des polluants n'est pas mesurable en poids ou en volume. C'est leur effet sur les conditions indispensables à la vie qui détermine la gravité du dommage. Il est exact que les déchets et les polluants non nucléaires nuisent à l'homme et à son milieu et que certains peuvent avoir des effets génétiques mais, dans le cas des déchets radioactifs, les dommages causés seraient plus graves et difficilement réparables.

Bien que certains pays aient ralenti l'exécution de leurs programmes d'équipement nucléaire, l'abandon de la fusion nucléaire ne serait toutefois ni raisonnable ni justifié [45]. Au stade actuel du développement des techniques nucléo-énergétiques, il importe de procéder à des études rigoureuses des diverses conséquences écologiques de chaque élément du cycle du combustible nucléaire, en vue de définir les mesures propres à assurer la protection de l'homme et de son milieu.

Le Programme des Nations Unies pour l'environnement étudie les effets écologiques de toutes les sources d'énergie. A sa quatrième session (1976), le Conseil d'administration du PNUÉ a demandé que soient établies des études approfondies sur les effets écologiques des combustibles fossiles, de l'énergie nucléaire et des sources d'énergie renouvelables. Ces études se déroulent en coopération avec les organismes des Nations Unies intéressés et d'autres organisations; elles constitueront une évaluation comparée complète de ces effets et doivent avant tout permettre de dresser une liste prioritaire des domaines de connaissance insuffisamment explorés.

Le présent document a été présenté à la Conférence internationale sur l'énergie d'origine nucléaire et son cycle du combustible, réunie en 1977 à Salzbourg (Autriche).

Références

- [1] NATIONS UNIES, Annuaire statistique, 1975; Publ. des Nations Unies, No. de vente E/F.76.XVII.1 (1976).
- [2] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ENERGIE ATOMIQUE, Power Reactors in Member States, AIEA, Vienne, 1976.
- [3] OCDE, Perspectives énergétiques jusqu'en 1985, OCDE, Paris (1974).
- [4] AEN-OCDE/AIEA, Uranium: ressources, production et demande, Rep OCDE, Paris (1976).
- [5] HANRAHAN, E.J., Demand for uranium, Atomic Industrial Forum, Phoenix, 1976.
- [6] KRYMM, R., and WOITE, G., Bulletin de l'AIEA **18** (1976) 6.
- [7] KENWARD, M., New Sci. **69** (1976) 686.
- [8] HANSEN, M., Bulletin de l'AIEA **18** (1976) 16.
- [9] JOHNSON, D.M., in Proc. 9th World Energy Conf., Detroit, 1974, US Natl. Energy Conf., London (1975), Paper 3.1-14.
- [10] DIECKAMP, H., Trans. Am. Geophys. Union **52** (1971) 756.
- [11] SAGON, L.A., Science **177** (1972) 487.
- [12] NATIONAL ACADEMY OF SCIENCE, The effects on populations of exposure to low levels of ionizing radiation (BEIR Report), Washington (1972).
- [13] EDSALL, J.T., Environ. Conservation **1** (1974) 21.
- [14] FOX, R.W., et al., Ranger uranium environmental inquiry, Australian Govt. Publ. Service, Canberra (1976).
- [15] ROSE, D., et al., Am. Sci. **64** (1976) 291.
- [16] BEVERLY, R.G., C.R. Colloque international sur la radioprotection dans l'extraction et le traitement de l'uranium, Bordeaux, 1974.
- [17] CLARK, D.A., State of the Art, Uranium Mining, Milling and Refining Industry, US Environmental Protection Agency Rep. EPA-660/2-74-038 (1974).
- [18] SNELLING, R.N., SHEAR, S.D., Radiol. Health Data Rep. **10** (1969) 475.
- [19] SNELLING, R.N., Radiol. Health Data Rep. **11** (1970) 511.
- [20] SNELLING, R.N., Radiol. Health Data Rep. **12** (1971) 17.
- [21] RUBIN, J.H., Gestion des déchets radioactifs (C.R. Colloque Paris), OCDE, Paris, 1973.

- [22] PARKER, H.E., WEST, P.J., in 9th World Energy Conf. Detroit 1974, US Natl. Energy Conf., London (1975), paper 4.2-15.
- [23] MAGNO, P.J., et al., 13th AEC Air Cleaning Conference, San Francisco, 1974.
- [24] KUNZ, C., et al., Health Physics Soc. Rep. CONF-74/018 (1974).
- [25] KUNZ, C., et al., Proc. Am. Nucl. Soc. Mtg. New Orleans, 1975, Trans. Am. Nucl. Soc. **21** (1975).
- [26] RUBLEVSKIJ, V.P., et al., USAEC Rep. CONF-730907-P1 (1974); C.R. 3^e Congrès int. de l'Association internationale pour la protection contre les radiations, Washington, 1973, Vol.1, p.296.
- [27] ROHWER, P.S., WILCOX, W.H., Nucl. Saf. **17** (1976) 216.
- [28] MASTERS, G.M., Introduction to Environmental Science and Technology, Wiley, London (1975).
- [29] FORD, D.F., KENDALL, W.H., An assessment of the ECC's rulemaking hearing, Union of Concerned Scientists, MIT, Cambridge (1973).
- [30] HENDRIE, J.M., Annu. Rev. Energy **1** (1976) 663.
- [31] LEWIS, H.W., et al., Rev. Mod. Phys. **47** Suppl. No.1 (1975).
- [32] USAEC, Rasmussen Report, WASH-1400 (1974).
- [33] EDSALL, J.T., Environ. Conservation **2** (1975) 205.
- [34] KENDALL, H.W., NUGLEWER, S., Preliminary Review of the AEC Reactor Safety Study, Sierra Club (1974).
- [35] LOVINS, A.B., Nuclear Power: Technical Bases for Ethical Concern, Friends of the Earth, London (1974).
- [36] AEN-OCDE, Opération d'évacuation des déchets radioactifs dans l'océan Atlantique, OCDE, Paris (1967).
- [37] WEBB, G.A.M., MORLEY, F., UK National Radiation Protection Board Rep. NRPB-R14, Harwell (1973).
- [38] AEN-OCDE, Pratiques de gestion des déchets radioactifs en Europe occidentale, AEN-OCDE, Paris (1972).
- [39] KRAUSE, H., Evacuation des déchets radioactifs, Rapp. AEN-OCDE, Paris (1972).
- [40] BLOMEKE, J.O., et al., Nucl. News **18** (1975) 62.
- [41] BAIR, J.W., THOMPSON, R.C., Science **183** (1974) 715.
- [42] TOMPLIN, A.R., COCHRAN, T.B., Radiation Standards for Hot Particles, Natural Resources Defense Council Rep., Washington (1974).
- [43] EDSALL, J.T., Bull. At. Sci. **32** (1976) 27.
- [44] FOWLER, J.M., Energy and the Environment, McGraw Hill, New York (1975).
- [45] FLOWERS, B., Nuclear Energy and the Environment, Royal Commission on Environmental Pollution, Rep. No.6, London (1976).