Diversité des rayonnements: l'énergie nucléaire sous son vrai jour

Etude comparée des sources radioactives de la biosphère

par Abel J. González et Jeanne Anderer

Nombreux sont ceux que préoccupent les rejets de matières radioactives dans l'environnement et les conséquences qui peuvent en résulter pour l'humanité. Et pourtant, tout au long de son histoire, l'homme a vécu plus ou moins exposé à des sources radioactives, les unes naturelles, les autres artificielles. Progressivement, la radioactivité artificielle s'est même incorporée au rayonnement naturel permanent. L'interaction de l'homme et de son environnement et les effets qui en résultent sous-tendent la dynamique du changement: la radioactivité ambiante diffère aujourd'hui de ce qu'elle était hier et ne cessera de se modifier dans l'avenir.

Paradoxalement, l'énergie nucléaire n'apporte qu'une part négligeable à la dose moyenne de rayonnement que reçoit la population, dont elle est cependant le principal sujet de préoccupation, alors que la radiologie médicale, source la plus importante d'exposition aux rayonnements artificiels, est prudemment acceptée parce qu'elle est utile. On s'inquiète encore moins des sources de radioexposition les plus considérables et les moins contrôlées que sont les sources naturelles.

De fait, il est pratiquement impossible d'échapper aux rayonnements du milieu, quoique certains individus y soient plus exposés que d'autres du fait de la nature ou de l'emplacement de leur demeure, de leur mode de vie et de la fréquence des soins médicaux qu'ils reçoivent.

Nul doute que l'on appréciera plus justement l'impact de l'énergie nucléaire sur le milieu si l'on considère avec objectivité l'exposition de l'homme à toutes les sources de rayonnement et son évolution dans l'avenir. Cet examen comparatif aidera à comprendre comment l'homme vit dans son milieu radioactif et comment il modifie ce dernier; plus important encore, il permettra de porter un jugement plus rationnel sur toutes les pratiques humaines qui font appel aux rayonnements. Telle est la démarche de cet article essentiellement fondé sur le rapport établi en 1988 par le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR)*. Ce document et ses annexes sont un exposé très objectif et digne de foi, fort utile pour l'étude de toutes les sources de rayonnement.

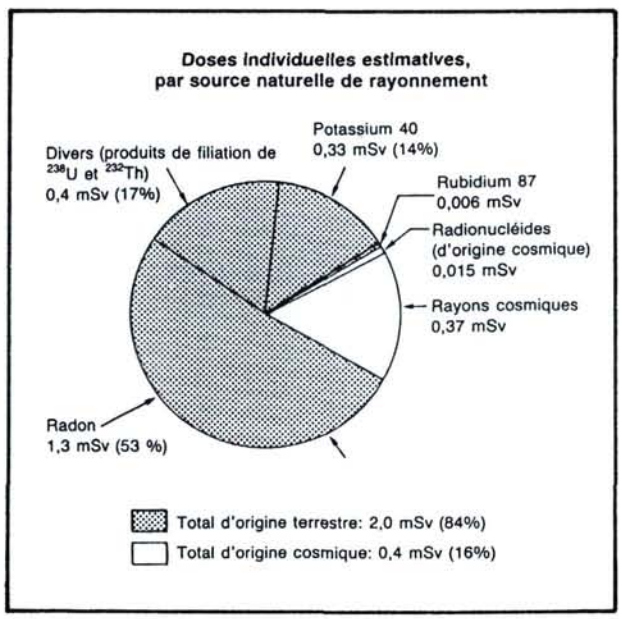
En matière de radioexposition, ce que l'on compare, ce sont les doses individuelles, après avoir établi les valeurs moyennes et extrêmes, et les doses collectives représentatives de l'effet global d'une source ou d'une pratique sur la société.

Le *fond naturel de rayonnement*

La plus forte dose de rayonnement que reçoit normalement l'être humain provient de sources naturelles *(voir le graphique)*. La dose moyenne annuelle due à cette source est d'environ 2,4 millisieverts (mSv); nous l'utiliserons ici comme valeur de référence. Cette

M. González est directeur adjoint de la Division de la sûreté nucléaire de l'AIEA, et Mme Anderer est membre de cette même Division. L'article est repris d'un mémoire présenté en septembre 1988 au treizième Colloque international de l'Institut de l'uranium de Londres.

* *Sources, effets et risques des rayonnements ionisants*, Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants, rapport à la Conférence générale de l'ONU, avec annexes, New York, 1988.



moyenne statistique recouvre des doses individuelles de l'ordre de un à cinq millisieverts par an, pouvant atteindre, dans les cas extrêmes, un sievert ou plus.

Les deux principales sources permanentes de rayonnement naturel sont le cosmos, d'où proviennent les rayons cosmiques, et la biosphère de la planète, où sont inclus des radionucléides présents essentiellement dans la croûte terrestre depuis des milliards d'années. L'irradiation est à la fois externe, par exposition aux rayonnements venant de l'espace extraterrestre et à ceux des matières radioactives naturelles qui nous entourent, et interne par exposition aux radionucléides naturels biologiquement associés à notre organisme, à l'air que nous respirons ou aux aliments et aux boissons que nous absorbons. La distinction est importante, car le rayonnement terrestre est de loin la source la plus importante d'irradiation naturelle puisqu'elle compte pour 85% de la dose annuelle moyenne. En outre, plus des deux tiers de cette irradiation naturelle est interne, et il est techniquement possible de réduire une bonne partie des expositions qui en résultent.

La source cosmique. Le rayonnement extraterrestre provient en fait d'une seule source: les rayons cosmiques. A la surface de la terre, ce rayonnement est relativement stable, mais il est influencé par le champ magnétique terrestre, les régions polaires recevant une dose plus forte que les zones équatoriales. La dose augmente fortement avec l'altitude, doublant pratiquement tous les 1500 mètres, mais, comme la grande majorité de la population vit au niveau de la mer ou à faible altitude, la dose varie peu par rapport à sa moyenne de 0,37 mSv. Toutefois, dans les agglomérations installées à grande altitude (par exemple Denver, aux Etats-Unis; Bogota, en Colombie; La Paz, en Bolivie), les doses annuelles à la population peuvent atteindre des valeurs quatre fois supérieures à la normale, égalant ou dépassant même un millisievert.

De même, les passagers et les équipages des aéronefs reçoivent des doses exceptionnellement élevées, mais de durée limitée.

Sources terrestres. Le rayonnement terrestre se manifeste dans tout l'environnement à diverses intensités selon la concentration de radioactivité dans les matières naturelles telles que roches, sol, eau, air, denrées alimentaires, et aussi le corps humain. Les sources les plus importantes sont le potassium 40, le rubidium 87 et les deux séries d'éléments de la chaîne de désintégration de l'uranium 238 et du thorium 232. Les autres radionucléides, tels les produits de filiation de l'uranium 235, contribuent peu à la radioexposition totale.

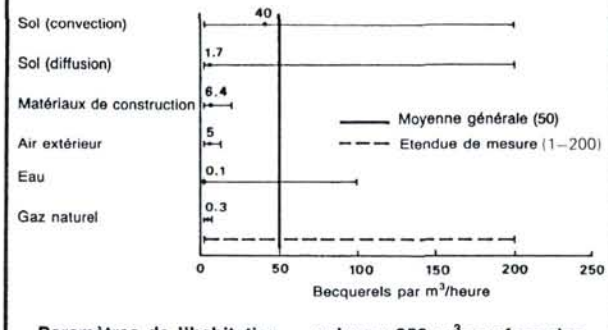
A l'extérieur des habitations, la principale source d'irradiation de la population est associée à certaines roches et à divers sols. En général, les roches ignées, tel le granit, sont plus radioactives que les roches sédimentaires, à l'exception des schistes et des phosphates naturels, fortement radioactifs. De récents relevés de la radiation ambiante à l'air libre dans 23 pays représentant plus de la moitié de la population mondiale n'ont révélé que de faibles variations. Il ressort de ces études qu'environ 95% de la population mondiale vit dans des régions où la dose annuelle moyenne de 0,4 mSv est normalement répartie. Cela dit, la documentation sérieuse dont on dispose indique des niveaux exceptionnellement élevés de rayonnement terrestre dans certaines régions. En Inde, par exemple, dans les zones côtières du Kerala et du Tamil Nadu, des sables contenant de la monazite riche en thorium délivrent des débits de dose jusqu'à 1000 fois supérieurs à ceux du fond naturel de rayonnement. Au Brésil, dans les régions de Guarapari, de Meaipe et de Pocos de Caldas, les débits de dose peuvent atteindre des valeurs 100 fois supérieures au niveau normal.

Comme l'être humain passe en général la plupart de son temps à l'intérieur de son habitation, le niveau de rayonnement auquel il y est exposé est une composante décisive de son irradiation. Le rayonnement terrestre à l'intérieur des locaux provient essentiellement d'une source omniprésente et inodore: le radon (terme qui désigne ici le radium 222, le radium 220 et leurs produits de filiation).

En moyenne, le radon intervient pour un peu plus de la moitié dans la dose individuelle reçue du fond naturel de rayonnement (soit 1,3 mSv par an). Dans les immeubles, sa présence a plusieurs origines, dont la plus importante est le terrain sur lequel l'immeuble est construit; viennent ensuite les matériaux de construction, l'air extérieur, l'eau courante et le gaz naturel *(voir la figure)*. On ne le mesure dans les habitations que depuis peu de temps et il est probable que l'on relèvera de très fortes concentrations dans maintes régions du monde où l'on construit sur des terrains ou avec des matériaux de construction fortement radioactifs.

Les autres sources d'irradiation interne d'origine terrestre sont le potassium 40, le plomb 210 et le polonium 210, mais, comparée à celle du radon, leur contribution à la dose annuelle moyenne est faible. Comme l'incorporation du potassium 40 dans l'organisme est autorégulée, elle varie peu. En revanche, les habitudes alimentaires peuvent influer sur les expositions internes au plomb 210 et au polonium 210. Par exemple, ces nucléides se concentrent dans les produits de la mer et l'on a constaté au Japon, où ces produits sont des aliments de prédilection, des concentrations par ingestion cinq fois plus fortes qu'en République fédérale d'Allemagne et en Inde et dix fois plus fortes qu'aux Etats-Unis. On sait aussi que le taux d'ingestion de ces radionucléides est particulièrement élevé parmi les populations du Grand Nord, où des dizaines de milliers

Débit de radon dans une habitation de référence



Paramètres de l'habitation — volume: 250 m³; surface des sols: 100 m²; surface des murs et plafonds: 300 m²; surface totale: 450 m²; renouvellement de l'air en 1 heure; épaisseur de la dalle de béton des sols et plafonds: 0,2 m; épaisseur des murs de brique extérieurs: 0,2 m

de personnes se nourrissent principalement de viande de renne ou de caribou. Ces cervidés s'alimentent de lichens qui concentrent le plomb et plus encore le polonium, ce qui explique que cette population subit une exposition environ 10 fois supérieure à la normale. Incidemment, on a détecté du plomb 210 et du polonium 210 dans le tabac et la fumée de cigarettes.

Additions à la radioactivité ambiante

Trois pratiques humaines sans rapport avec la production d'électricité d'origine nucléaire ont un effet sur la radioactivité du milieu: l'expansion des applications médicales des rayonnements, les essais d'armes nucléaires dans l'atmosphère et les procédés industriels faisant appel aux radionucléides naturels. La radioexposition professionnelle qui résulte de ces activités semble jouer un rôle secondaire.

Applications médicales des rayonnements. L'irradiation à des fins médicales contribue largement à la radioactivité ambiante. La dose moyenne annuelle se situe entre 0,4 et 1 mSv, selon la méthode de calcul utilisée.

Les applications médicales les plus répandues sont les examens radiologiques aux fins de diagnostic médical ou dentaire, le diagnostic à l'aide de radionucléides à usage interne, et la radiothérapie du cancer et autres affections. Cette dernière est un cas particulier dans le cadre de cet article. En effet, contrairement à la radiographie dentaire ou autre fréquemment pratiquée et à laquelle on ne prête pas attention, l'irradiation à des fins thérapeutiques est perçue comme une exception, étrangère à la réalité de la vie et sans rapport avec la radioactivité du milieu. Le public ne se sent pas directement concerné. Les risques que comportent les fortes doses utilisées en radiothérapie n'ont d'ailleurs jamais figuré à l'ordre du jour des débats publics sur les dangers de l'irradiation. Statistiquement, la réalité est probablement tout autre: on peut s'attendre qu'un quart environ de la population doive un jour subir un radiotraitement. La radioexposition à des fins thérapeutiques est cependant exclue de l'analyse comparative.

Il est regrettable que l'information sérieuse et précise dont on dispose ne provienne pour l'essentiel que des pays avancés, lesquels représentent moins d'un quart des cinq milliards d'habitants du globe. Des renseignements plus fragmentaires existent pour un autre quart, mais pour les 2,5 milliards restants, on ne sait pratiquement rien, ni même si les rayonnements sont utilisés. Cette lacune semble être l'indice de situations sans commune mesure, et certains experts en ont conclu que près des trois quarts des habitants de la planète ne bénéficient pratiquement pas de l'assistance médicale qu'apporte le diagnostic radiologique.

La radiographie médicale. Les examens radiographiques aux rayons X représentent près de 95% du total annuel de l'irradiation à des fins médicales. Les chiffres ne rendent pas compte des écarts considérables d'intensité et de fréquence du radiodiagnostic. Par exemple, dans les pays où les services de santé publique sont les plus développés (selon l'UNSCEAR), il y a un appareil à rayons X en moyenne pour 4000 personnes, contre 170 000 dans les pays où le niveau sanitaire est le plus bas. Dans les pays du premier groupe, on compte en moyenne 800 examens radiologiques par an par 1000 habitants, tandis que, dans les pays du second groupe, on en pratique moins de 30.

Indépendamment de la fréquence des examens, les doses individuelles diffèrent selon la nature de l'examen, la méthode adoptée et la performance du matériel. Tout d'abord, la pratique autrefois habituelle de la radiographie pulmonaire en masse n'est plus jugée utile dans la plupart des pays avancés, alors qu'il semble que ce soit le contraire dans de nombreux pays en développement. Dans certains pays d'Asie, par exemple, elle représente plus des trois quarts des examens. De plus, alors que, dans les pays les plus avancés, l'examen est pratiquement toujours, si non exclusivement, radiographique, les renseignements obtenus sur les pays en développement semblent indiquer que l'on y pratique encore couramment la radioscopie, méthode qui multiplie par 15 la dose de rayonnement.

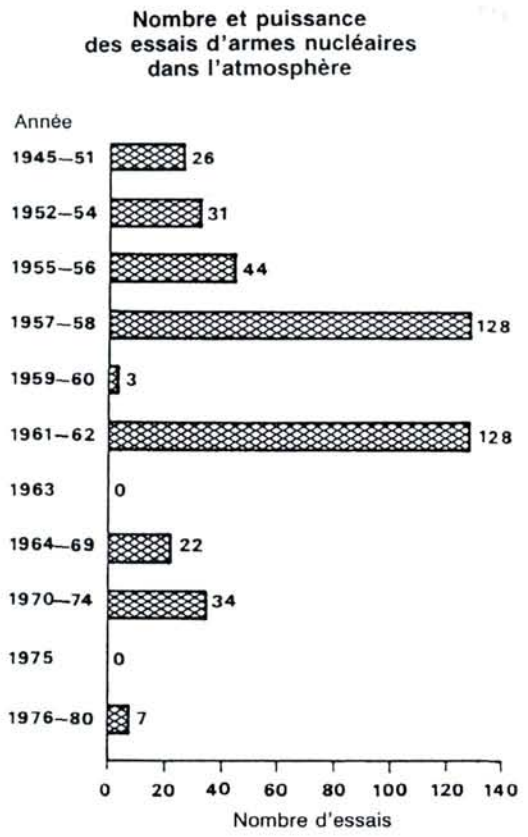
L'insuffisance de données sur la radioscopie dans les pays sanitairement sous-équipés est une cause majeure d'incertitude qui interdit encore toute conclusion sérieuse sur les doses résultant du diagnostic aux rayons X. Pour nombre de pays en développement, on n'en sait pas davantage sur la performance des appareils, autre facteur important de l'évaluation des doses. Détail néanmoins significatif, on estime que 30 à 70% du matériel ne fonctionne pas convenablement.

Radiographie dentaire. Cet examen ne représente que 1% de la radioexposition à des fins médicales et implique une dose individuelle moyenne de 0,04 mSv par radiographie. C'est le diagnostic aux rayons X le plus fréquent; quelque 340 millions sont pratiqués chaque année, dont la plupart dans les pays dotés de services de santé publique bien développés.

Méthodes nucléaires de diagnostic. La fréquence de ces examens n'a cessé de croître dans le monde depuis l'avènement de la médecine nucléaire, il y a une trentaine d'années. On note périodiquement, dans certains pays, un certain fléchissement dû au recours à la tomographie informatisée du cerveau et autres organes ou aux techniques ultrasoniques qui dispensent des rayonnements ionisants. Les doses ne représentent que 4% de toutes les radioexpositions à des fins médicales. Les méthodes d'irradiation diffèrent d'un pays à l'autre et à l'intérieur d'un même pays; les techniques nucléaires de diagnostic ne font pas exception. Selon le radionucléide utilisé (iode 131 ou technétium 99m), les doses annuelles moyennes varient considérablement.

Essais d'armes nucléaires. Entre 1945 et 1980, plus de 400 explosions d'armes nucléaires ont eu lieu dans l'atmosphère à titre d'essais *(voir le graphique page 24)*. Deux campagnes particulièrement actives ont marqué cette période: 1957–1958 et 1961–1962, avec 128 explosions chacune, mais la puissance totale des engins de la seconde campagne était quatre fois supérieure. Quoi que l'on puisse penser de l'éthique de cette entreprise, le fait est que les essais ont eu lieu et ont libéré des quantités substantielles de matières radioactives dans l'environnement.

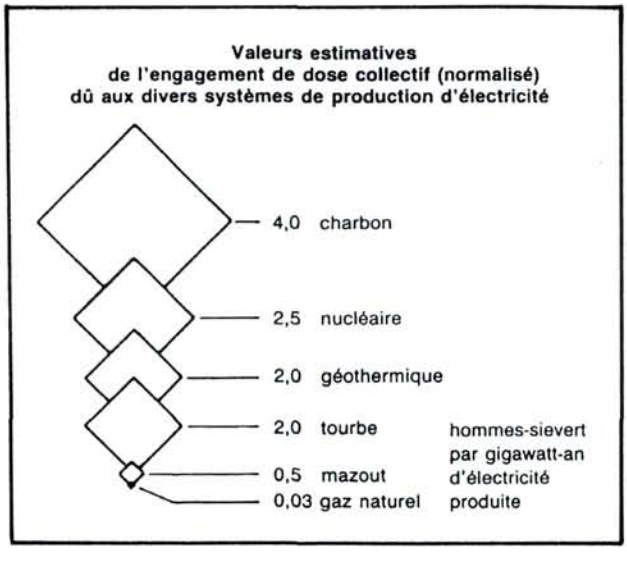
Les retombées des explosions dans l'atmosphère contiennent plusieurs centaines de radionucléides, dont quatre seulement concernent les populations actuelles et futures: le carbone 14 (période de 5730 ans), le



césium 137 (période de 30 ans), le strontium 90 (période de 30 ans) et le tritium (période de 12 ans). Actuellement, le carbone 14 compte pour les deux tiers de la radioexposition résultante; vu la période des autres radionucléides, il sera le seul en lice vers la fin de ce siècle. Notons une très faible contribution du plutonium 239, du plutonium 240 et de l'américium 241 (0,1%) au débit de dose pendant un certain nombre de millénaires. Pour l'individu, la dose annuelle moyenne est seulement de 0,01 mSv, mais l'engagement de dose collective aux générations futures est le plus élevé d'origine artificielle.

Opérations industrielles et radionucléides naturels. Certaines opérations industrielles, telles l'exploitation de l'énergie géothermique et l'extraction des phosphates naturels, amènent à la surface de la terre des matières contenant des concentrations de radionucléides naturels supérieures à la moyenne. D'autres processus, telles l'utilisation du charbon comme combustible et la production d'engrais phosphatés, font intervenir des matières ayant une teneur moyenne ou supérieure à la moyenne en radionucléides naturels et les concentrent dans certains produits ou sous-produits. L'effet de leur apport à la radioactivité ambiante n'a pas été décelé. Toutefois, les mesures n'ont pas été faites systématiquement et la croissance accélérée de certaines activités industrielles, notamment la production d'énergie, donne toute raison de penser que leur impact se fera sentir au cours des prochaines décennies. La production d'électricité, à partir d'autres sources que l'énergie nucléaire, est aussi une cause de radioexposition du public et l'impact radiologique de certaines centrales classiques est comparable à celui des centrales nucléaires *(voir le diagramme)*.

Dans de nombreux pays, le charbon est une option viable pour répondre à la demande croissante d'électricité. Sur les 2,7 milliards de tonnes d'équivalent charbon produits dans le monde en 1981, près de 70% ont été consacrés à la production d'électricité, 20% à la carbonisation et 10% aux usages domestiques. Comme la plupart des produits naturels, le charbon contient des radionucléides naturels, lesquels sont libérés par la com-



bustion, en quantités qui sont fonction de leur concentration dans le charbon, de la teneur en cendres, de la température de combustion, de la séparation du mâchefer qui se dépose sur les grilles des foyers et des cendres volantes plus légères, et enfin de l'efficacité du filtrage des fumées. Les centrales au charbon en service dans le monde se classent *grosso modo* en deux catégories : les centrales anciennes, qui rejettent environ 10% des cendres volantes, et les centrales modernes équipées de dispositifs antipollution perfectionnés, qui n'en rejettent que 0,5%. En supposant que les deux tiers de ces centrales sont à considérer comme anciennes, la production d'un gigawatt-an d'électricité correspond à une dose collective engagée normalisée de quatre hommes-sievert.

La combustion du charbon comporte d'autres risques radiologiques. Une grande partie des cendres volantes recueillies sert à la préparation de ciments et mortiers, de sorte que l'emploi de ces matériaux radioactifs en construction peut élever les niveaux de radioexposition. Le reste sans utilisation industrielle est la plupart du temps déchargé aux alentours de la centrale, ce qui implique un risque possible d'irradiation par remise en suspension et contamination des eaux superficielles et souterraines. Nous ne disposons malheureusement d'aucune évaluation des doses de rayonnement dues à ces pratiques.

L'énergie géothermique est, elle aussi, une source de radioexposition. Sa part dans la production d'électricité est modeste, mais son importance relative augmentera certainement. La plupart de la radioactivité que contiennent les fluides géothermiques provient de la chaîne de désintégration de l'uranium, et plus particulièrement du radon. D'après les mesures qui ont été faites dans plusieurs pays, la dose engagée collective normalisée due au radon est estimée à deux hommes-sievert par gigawatt-an d'électricité produite.

Dans certaines régions, en particulier dans les pays nordiques, la tourbe est utilisée comme combustible pour produire de l'énergie. Or, l'écoulement des eaux superficielles et des eaux souterraines entraîne des radionucléides naturels vers les tourbières où ils s'incorporent à la tourbe. On a peu de renseignements sur les rejets de radionucléides naturels dans l'environnement par les centrales à la tourbe, mais, en supposant qu'il faille cinq millions de tonnes de tourbe pour produire un gigawatt-an, on évalue à deux hommes-sievert la dose collective engagée normalisée qui en résulte. A longue échéance, il est possible que l'accumulation et l'élimination de la cendre de tourbe riche en uranium aggravent encore la situation.

Quant au mazout et au gaz naturel brûlés dans les centrales électriques du monde entier, leur contribution à la radioexposition des populations est plus modeste, les doses engagées collectives correspondantes étant respectivement de 0,5 et 0,03 homme-sievert par gigawatt-an.

Radioexposition professionnelle. Les rayonnements naturels sont, eux aussi, la cause d'une radioexposition professionnelle. Comme nous l'avons vu, les équipages des avions de ligne sont exposés à des niveaux très élevés de rayonnement cosmique. Selon l'information dont on dispose pour la période 1979–1983, la dose individuelle annuelle approcherait 15 mSv. De même, le personnel travaillant dans des immeubles à usage de bureau, dans les magasins et dans les ateliers ainsi que les aides ménagères dans les habitations privées peuvent recevoir des doses de rayonnement naturel étonnamment élevées — bien supérieures aux limites de dose fixées dans l'industrie nucléaire — s'il existe de fortes concentrations de radon dans ces locaux.

En ce qui concerne la radioexposition professionnelle à des nucléides naturels dans l'industrie, on ne dispose de renseignements que pour quelques pays, dont la précision laisse d'ailleurs à désirer. Les estimations sont donc assez approximatives. Dans les centrales au charbon, l'exposition du personnel est essentiellement due à l'inhalation des cendres volantes, et la dose collective mondiale est d'environ 60 hommes-Sv. Le traitement et le transport des phosphates naturels sont responsables d'une dose collective estimée à 20 hommes-Sv, laquelle peut atteindre 50 hommes-Sv lorsqu'il s'agit de la manutention des engrais phosphatés. Il est difficile de se renseigner sur la radioexposition professionnelle due aux opérations sur le combustible associées aux essais d'armes nucléaires, mais il semblerait qu'elle n'est pas négligeable vu la radiotoxicité de certains des radionucléides en cause et le fait que les mesures de protection ne sont pas toujours aussi strictes que pour les applications pacifiques des rayonnements.

En ce qui concerne la radioexposition professionnelle due aux diverses applications médicales, l'équivalent de dose collective annuelle est de 1 homme-Sv par million d'habitants et, bien que le recours à ces méthodes se généralise dans le monde entier, les données fragmentaires dont on dispose laissent prévoir une diminution des doses annuelles de 10 à 20% par décennie.

Energie nucléaire et radioactivité

Examinons maintenant les niveaux de rayonnement associés à l'exploitation normale des centrales nucléo-électriques. Depuis la mise en service en 1956 de la première centrale nucléaire industrielle, le parc nucléaire mondial a accumulé plus de 5000 années de réacteur dans des conditions d'exploitation relativement sûres. Cette activité, comme toutes les entreprises humaines, comporte naturellement des risques d'accident, mais la probabilité est très faible. L'accident du réacteur de Tchernobyl-4, en Union soviétique, a matérialisé ce risque en projetant dans la réalité les effets radiologiques d'un accident grave, jusque-là hypothétiques. Etant donné la distribution irrégulière de la radioactivité, il n'est pas certain que l'on puisse comparer l'irradiation résultant de cet accident avec celle qui provient de sources stables comme le rayonnement naturel. La comparaison peut être utile néanmoins pour apprécier les effets des conditions extrêmes nées de cet accident.

Comme la question de l'élimination des déchets radioactifs de l'industrie nucléaire retient l'attention dans le débat public que provoque le développement de l'énergie nucléaire, il est opportun d'examiner ici brièvement les effets radiologiques possibles de ces déchets. Bien souvent, la préoccupation du public tient à la notion erronée qu'il est impossible de surveiller ou de gérer ces matières sans risque à longue échéance. Ces

craintes sont à l'opposé de l'opinion des spécialistes qui, eux, font confiance aux solutions techniques. En bref, la gestion correcte des déchets d'un traitement convenable du combustible irradié a un impact radiologique si minime que, même dans l'hypothèse la plus pessimiste, les doses qui en résulteraient dans quelques millénaires pour les populations seraient en fait nulles. Aussi, l'analyse comparative des niveaux de radioactivité omet-elle la question de l'élimination des déchets.

Production nucléo-électrique courante. En temps normal, cette activité ne rejette que des quantités négligeables de matières radioactives dans l'environnement. En moyenne, la dose annuelle due au cycle complet du combustible nucléaire ne représente qu'une fraction infime (moins de 0,1%) de la dose reçue du fond naturel de rayonnement.

Les radioexpositions dues à la production nucléo-énergétique se produisent à tous les stades du cycle du combustible et les doses au public et aux travailleurs sont évaluées dans l'espace et dans le temps *(voir les graphiques).*

Extraction et traitement du minerai d'uranium. Les travaux miniers produisent des effluents radioactifs qui, pour la plupart, se retrouvent dans l'air de ventilation des mines souterraines ou se dégagent des mines à ciel ouvert. Les terrils de minerais et de déblais sont la cause d'une contamination atmosphérique dans l'immédiat et plus encore à long terme. La pratique courante consiste à entasser les schlamms simplement à l'air libre, sans autre aménagement, ou à édifier des levées pour les maintenir ensuite sous une couverture solide ou liquide. Le radon qui se dégage en cinq ans du fait de ces opérations minières engage une dose de 0,1 homme-sievert par gigawatt-an d'électricité produite. Les doses engagées collectives aux populations locales et régionales sont de 0,3 et 0,04 homme-sievert par gigawatt-an, respectivement pour l'extraction et le traitement des minerais.

Fabrication du combustible. Cette opération rejette relativement très peu d'effluents dans l'atmosphère et l'hydrosphère. La plupart des composés contenant de l'uranium sont à l'état solide et peuvent être facilement extraits des aérosols. L'engagement de dose collective au public est de 0,003 homme-sievert par gigawatt-an.

Exploitation des réacteurs. Les doses au public résultant de cette opération diminuent régulièrement depuis quelques années, alors que la production d'électricité augmente. Ce phénomène est dû en partie aux dispositifs très complets de radioprotection qui équipent les centrales nucléaires et en partie à la rationalisation de l'exploitation des centrales. Par exemple, les rejets de carbone 14 dans l'atmosphère ont diminué de moitié par rapport à ceux que l'UNSCEAR signalait en 1982. Ce détail a son importance, car le carbone 14 est responsable d'une bonne partie de l'engagement de dose collective au public qui atteint 2,5 hommes-sievert par gigawatt-an.

Retraitement du combustible. Plusieurs usines de retraitement fonctionnent actuellement, dont celle de Sellafield (anciennement Windscale), au Royaume-Uni, et celles de La Hague et de Marcoule, en France. A elles trois, ces installations ne retraitent qu'une faible proportion du combustible irradié de toutes les centrales du monde, la plus grande partie étant stockée en attendant les décisions de principe des autorités nationales responsables. Les radionucléides de longue période contenus dans les effluents (par exemple, le carbone 14, le tritium, le krypton 85 et l'iode 129) sont les plus gênants. La dose engagée collective de 1,27 hommes-sievert par gigawatt-an est essentiellement imputable aux effluents liquides.

Transport. La radioexposition des populations locales et régionales due au transport de matières nucléaires entre les divers établissements du cycle du combustible est relativement faible, la dose engagée collective étant à peu près de 0,1 homme-sievert par gigawatt-an.

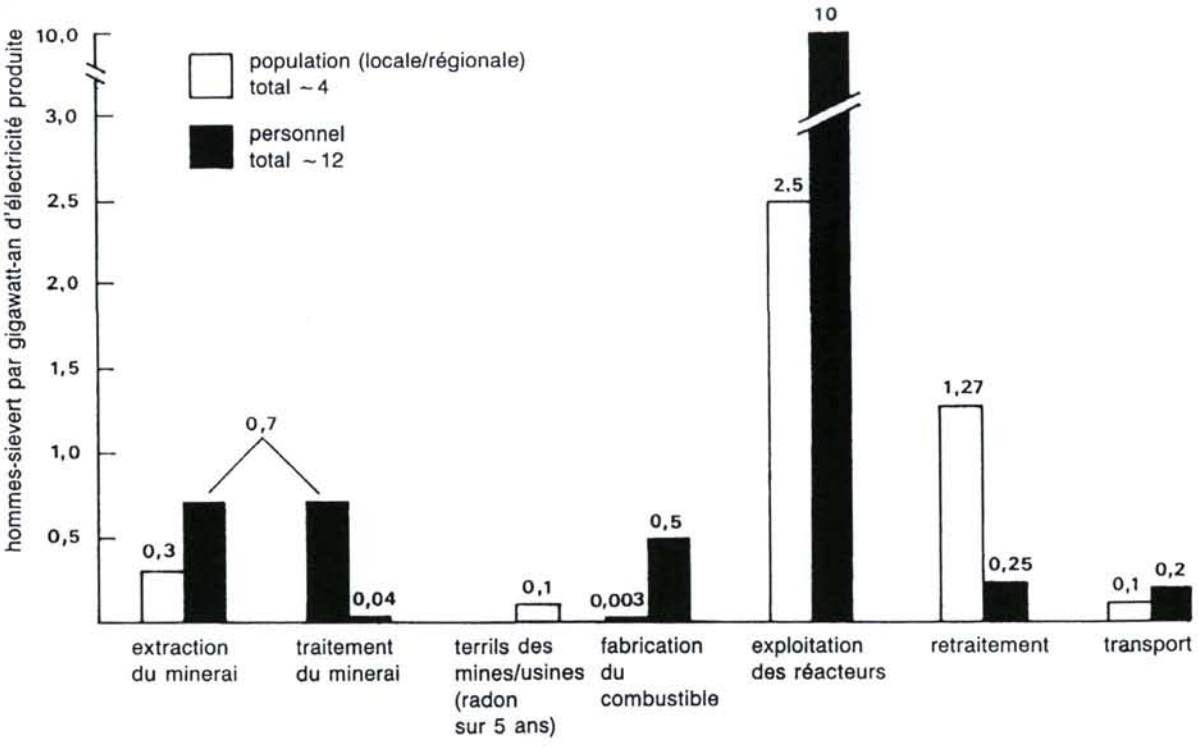
Radioexposition professionnelle. L'exposition du personnel des diverses installations du secteur de l'énergétique nucléaire peut varier considérablement. C'est le personnel de maintenance, et plus particulièrement celui des équipes de réparation des centrales nucléaires, qui reçoit les doses les plus fortes, tandis que le personnel des mines d'uranium, en particulier les mineurs de fond, est exposé au radon et à ses produits de filiation.

Perspectives à long terme. Les diverses opérations du cycle du combustible libèrent également des radionucléides de très longue période dont le séjour dans la biosphère se chiffre en millénaires. En prenant comme hypothèse que ces radionucléides irradient pendant une période infinie, l'engagement de dose atteint 69 hommes-sievert par gigawatt-an, dont 10% seulement seront délivrés au cours des cent prochaines années. Au cours des 10 000 ans qui suivront, l'exposition au radon des schlamms deviendra significative, car elle apportera jusqu'à 150 hommes-sievert par gigawat-an.

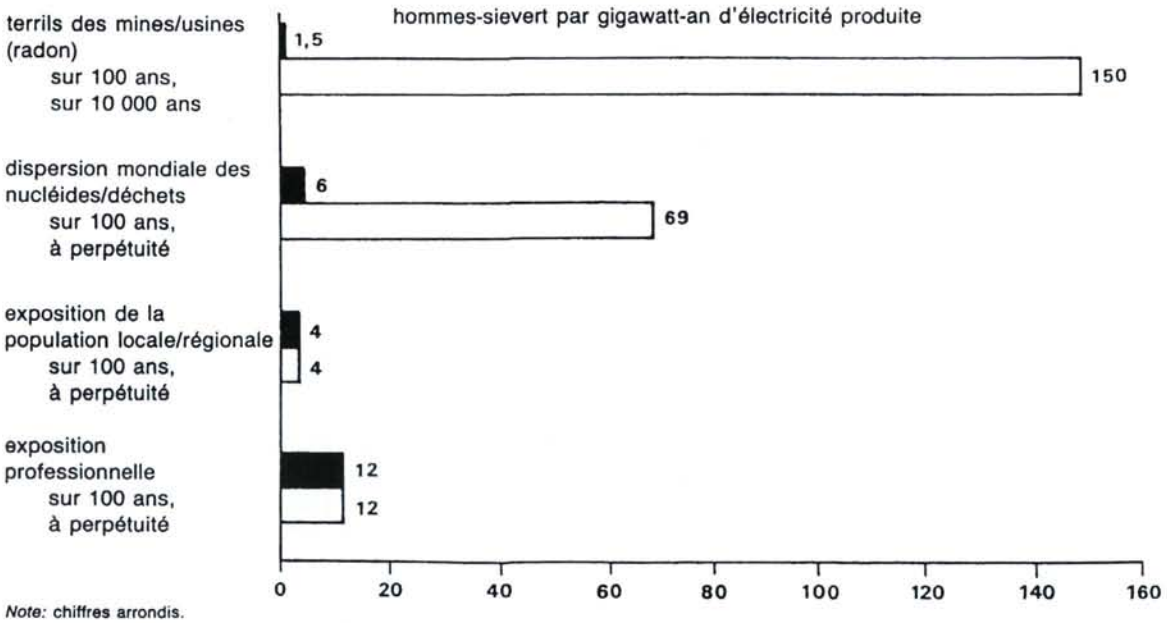
L'accident de Tchernobyl: des hypothèses à la réalité. Bien que les incidences radiologiques des centrales nucléo-électriques soient insignifiantes dans les conditions normales d'exploitation, l'inquiétude persiste quant aux conséquences d'un accident éventuel. Or, les radioexpositions qu'elles impliquent peuvent être désormais considérées d'un œil réaliste grâce à l'abondante documentation sur les retombées radioactives de l'accident de Tchernobyl qui a été recueillie et analysée par les équipes internationales et nationales compétentes — entre autres le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants, l'Organisation mondiale de la santé et l'AIEA — qui ont étudié en collaboration les conséquences radiologiques globales de l'accident à partir des renseignements communiqués par près de 40 pays.

L'accident. L'accident survenu le 26 avril 1986 à l'unité n° 4 de la centrale s'est produit pendant un essai technique à faible puissance, alors que les systèmes de sûreté étaient déconnectés. Les instabilités n'ont pu être maîtrisées et ont provoqué les explosions et les incendies qui ont gravement endommagé le cœur du réacteur et les structures de confinement. Des gaz et des aérosols radioactifs se sont dégagés dans l'atmosphère: 25% le premier jour et le reste au cours des neuf jours suivants. Le dixième jour après l'accident, les feux étaient éteints et le cœur du réacteur isolé. Le réacteur est maintenant enfermé à titre permanent dans une casemate qui confine la radioactivité résiduelle.

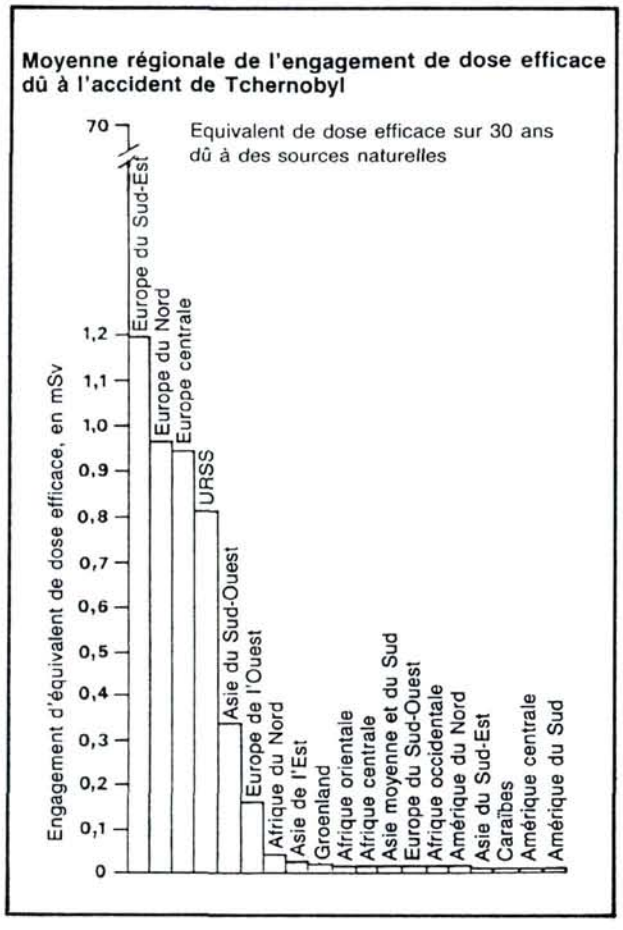
Valeurs estimatives à court terme des engagements de dose collectifs (normalisés) dus au cycle du combustible nucléaire



Valeurs estimatives à long terme des engagements de dose collectifs (normalisés) dus au cycle du combustible nucléaire



Note: chiffres arrondis.



Les rejets de matières radioactives ont été emportés par les vents, d'abord en direction du nord, puis vers l'ouest et le sud-ouest et dans d'autres directions encore. Leur transport atmosphérique à longue distance a dispersé la radioactivité dans tout l'hémisphère Nord, mais aucune contamination n'a atteint l'hémisphère Sud. Les retombées radioactives ont été essentiellement le fait de précipitations sporadiques. Elles se composaient surtout d'iode 131, de césium 134 et de césium 137, principaux responsables de l'irradiation externe par contamination du sol, et interne par ingestion d'aliments contaminés.

La réponse. Le puissant dispositif d'intervention sanitaire mis en œuvre immédiatement par les autorités soviétiques et les services de santé publique ont largement contribué à réduire le risque de radioexposition du public. Les mesures de décontamination, l'enlèvement des couches superficielles du sol, le contrôle radiologique des denrées alimentaires et du bétail, et leur destruction éventuelle, ainsi que les restrictions imposées aux agriculteurs ont ramené les niveaux d'irradiation dans la région à des valeurs bien inférieures aux évaluations pessimistes faites peu après l'accident, avant que les antennes d'urgence aient pu atteindre les zones contaminées et leur population. Dès l'été de 1987, 60 000 maisons et autres constructions de quelque 600 agglomérations avaient été décontaminées.

En dehors de l'Union soviétique, les précautions prises immédiatement après l'accident dans de nombreux pays ont effectivement contribué à limiter les doses individuelles et collectives.

Niveaux, localisation et causes de la radioexposition. Les relevés de la contamination par les principaux radionucléides ont donné lieu à des évaluations très variables de la dose au public. Les doses engagées dues à l'accident s'étaleront sur une trentaine d'années et résulteront en majeure partie de l'exposition continue au césium 137. Même la dose engagée moyenne régionale la plus élevée (près de 1,2 mSv), calculée pour les populations de l'Europe du Sud-Est, ne représente qu'une très petite fraction de la dose moyenne inévitable (environ 70 mSv) que le fond naturel de rayonnement délivrera dans le même temps *(voir la figure)*.

Il n'y a pas lieu non plus de s'alarmer des doses reçues pendant la première année après l'accident. En effet, la population exposée de la région de Biélorussie a reçu, pendant cette première année, une dose moyenne à peu près équivalente à celle qu'elle doit au fond naturel de rayonnement. Dans d'autres régions d'Europe, les doses reçues pendant cette même période ont varié entre 25 et 75% de la dose annuelle naturelle. Les pays à l'extrême ouest de l'Europe, ainsi que les pays d'Asie, d'Afrique du Nord, d'Amérique centrale et d'Amérique du Nord ont été moins touchés. Cette situation correspond bien à la distribution de la contamination déposée.

Aucun sujet de préoccupation. Nul doute que l'accident de Tchernobyl est l'urgence radiologique la plus grave qu'ait connue l'humanité. Outre les assurances que l'on peut trouver dans le rapport de l'UNSCEAR, l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'Organisation de coopération et de développement économiques a publié, en janvier 1988, les résultats de son évaluation des retombées radioactives constatées dans les pays de l'OCDE à la suite de l'accident, concluant en substance que les habitants des pays de l'OCDE n'ont certainement pas reçu de doses sensiblement supérieures à celles qui correspondent à une année d'exposition au fond naturel de rayonnement. En conséquence, le risque individuel de dommage radio-induit qui en résultera pour les habitants de ces pays, pendant toute leur vie, n'a pas été sensiblement modifié par l'accident; les effets possibles (cancers et altérations génétiques), que l'on peut calculer à partir des doses collectives, n'augmenteront pas notablement l'incidence naturelle de ces affections parmi la population.

Le bilan

Il est désormais possible de faire l'étude comparée, à l'échelle mondiale, des engagements de doses individuelles et collectives dues à la radioactivité présente dans l'environnement humain et de présenter un tableau clair et concret de la situation:

- La contribution de l'énergie nucléaire à la radioactivité ambiante peut être considérée comme négligeable: elle est inférieure de plusieurs ordres de grandeur à celle de toutes les autres sources auxquelles l'homme est exposé. Vue sous l'angle de l'engagement de dose collectif, dans des circonstances normales et à l'exclusion de la dose engagée due aux radionucléides de très longue période, l'exposition de la population mondiale due à une année d'exploitation des centrales nucléaires équivaut à huit heures supplémentaires d'exposition au fond naturel de rayonnement. Lorsque les radio-

nucléides de longue période (principalement le carbone 14) sont inclus, le supplément est de quelque 37 heures *(voir graphiques)*.

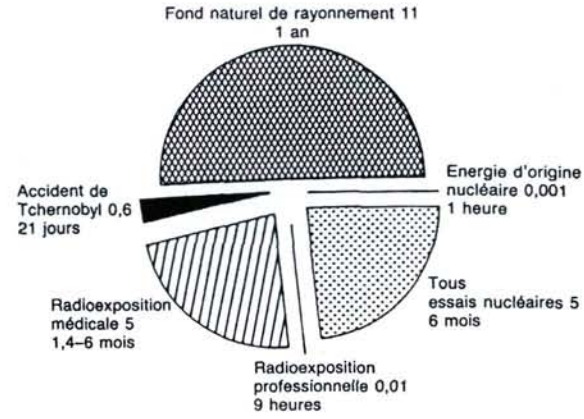
Même dans un cas extrême comme celui de Tchernobyl, la dose engagée collective pour les 30 prochaines années, essentiellement due au césium 137, n'équivaut qu'à 21 jours d'exposition supplémentaire aux rayonnements naturels.

- Les irradiations à des fins médicales, notamment la radiographie X, contribuent largement à la radioactivité ambiante. La dose annuelle moyenne qui leur est imputable représente 20 à 45% de la dose individuelle annuelle reçue du fond naturel de rayonnement. La fréquence et l'intensité des applications sont très variables, certains individus étant exposés médicalement deux fois plus qu'ils ne le sont naturellement. L'exposition collective à des fins médicales équivaut à une exposition supplémentaire annuelle de 1,4 à 6 mois aux rayonnements naturels. Il est d'ailleurs probable que l'irradiation médicale sera de plus en plus fréquente au cours des prochaines décennies car l'être humain vivra plus longtemps et les services médicaux atteindront un nombre croissant de sujets dans les régions en développement. Il est probable qu'en l'an 2000 la dose collective aura augmenté de 50% et qu'elle aura doublé en 2025.
- De toute évidence, le rayonnement du carbone 14 influe sur la dose engagée résultant des essais d'engins nucléaires dans l'atmosphère qui ont eu lieu au cours des dernières décennies. Si l'on tient compte de ce radionucléide de longue période dans l'évaluation, la dose engagée collective annuelle équivaut alors à 28 mois supplémentaires d'exposition aux rayonnements naturels.

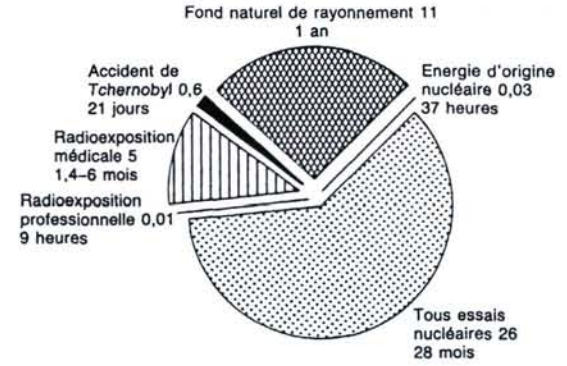
Dernier détail, les expositions professionnelles représentent un peu moins de neuf heures supplémentaires par an d'exposition aux rayonnements naturels.

Engagements de dose collectifs (en millions d'hommes-sievert) et leurs équivalents en durée d'exposition au fond naturel de rayonnement

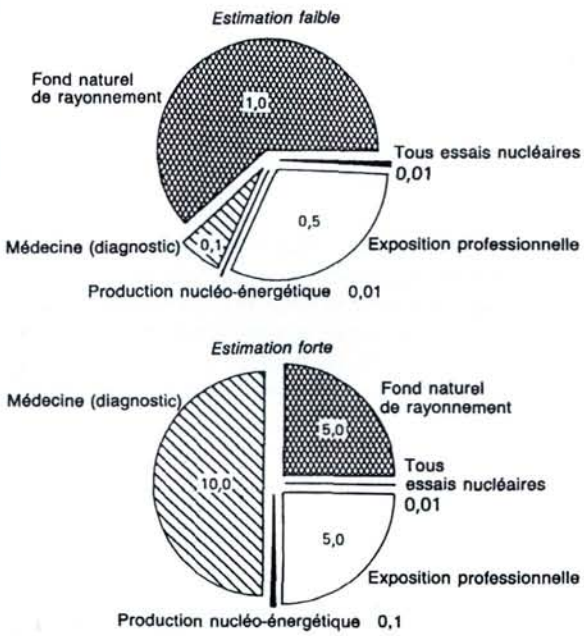
A l'exclusion de l'exposition aux radionucléides de très longue période



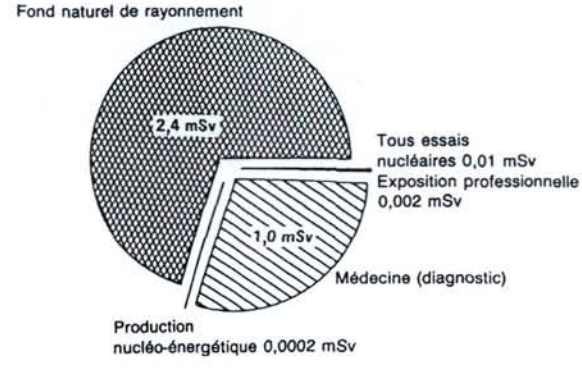
Y compris l'exposition aux radionucléides de très longue période



Doses individuelles moyennes actuelles (mSv)



Doses individuelles annuelles moyennes reçues de sources naturelles et artificielles



Conclusions

Le problème de la communication. On peut logiquement conclure que la production d'électricité d'origine nucléaire dans des conditions normales ne modifie pas sensiblement le rayonnement ambiant. Tout bien considéré, les effets de l'accident de Tchernobyl ne sont pas aussi désastreux qu'on les a dépeints à mauvais escient. Comment se fait-il donc que le problème de l'énergie nucléaire soit si mal compris? Peut-être le public a-t-il une vue courte et ne voit-il dans les rayonnements qu'une émanation du nucléaire, sans avantages tangibles. Or, d'autres pratiques humaines sont tolérées, voire bienvenues. Pour un malade, les avantages de la radiothérapie sont évidents; mais, pour quelqu'un qui n'est pas curieux et s'est habitué à la commodité de l'électricité, les avantages du nucléaire ou les inconvénients de son abandon progressif sont bien moins évidents.

Il se pose un grave problème de communication, faute d'un point commun qui faciliterait la compréhension entre le spécialiste qui sait que l'énergie nucléaire ne nous expose qu'à de faibles niveaux de radioactivité et un public inquiet qui ne se laisse pas si aisément convaincre par les propos apaisants de l'expert. Il faut aborder franchement les sujets de préoccupation de ce public, exposer les faits dans un langage facilement compréhensible, qui soit crédible et inspire confiance. Les conclusions de l'UNSCEAR permettent de faire ce pas.

Réduction des doses: maintes possibilités. Nombreux sont en outre les moyens de réduire les doses de rayonnement sans compromettre les avantages des pratiques radiologiques. Les tentatives pour maîtriser l'irradiation naturelle sont prometteuses. Par exemple, l'application d'une feuille d'aluminium sur les murs construits en béton contenant du schiste alumifère radioactif réduit de près de 50% la contamination par le radon; il existe aussi un enduit spécial qui permet de l'abaisser de 20 à 80%. En médecine, il est également possible de prévenir les irradiations inutiles. De nouvelles techniques, telles la visualisation aux ultrasons et celle par résonance magnétique, remplacent progressivement les rayons X, notamment pour les examens de la colonne vertébrale, des reins et de la vésicule biliaire. Les progrès techniques des 20 dernières années vont permettre de limiter considérablement les doses aux malades. La réduction de loin la plus importante — de cinq à 20 fois — est obtenue en remplaçant les divers procédés de radioscopie par la radiographie. On peut aussi, quoique le résultat soit plus modeste, recourir à des accessoires simples et peu onéreux, tels que collimateurs, filtres supplémentaires et écrans protecteurs des gonades et de la thyroïde, lors des examens radiographiques. Il serait aussi possible de réduire les doses jusqu'à 50% en formant le personnel à l'emploi, à l'étalonnage et à l'assurance de la qualité du matériel médical; dans de nombreux pays, en effet, plus de la moitié du personnel de radiographie est pratiquement sans formation systématique.

L'industrie nucléo-énergétique, qui contribue déjà si peu à la contamination radioactive, prend aussi des mesures dans le même sens. Selon l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE, il serait possible de réduire jusqu'à six millions de fois et plus les expositions au radon provenant des résidus du traitement des minerais d'uranium. Cette approche est adoptée à tous les stades du cycle du combustible. La radioexposition au niveau de l'exploitation des réacteurs diminue elle aussi, malgré l'accroissement de la puissance installée, surtout grâce au perfectionnement des systèmes de protection et à la robotisation. La phase terminale du cycle du combustible ne fait pas exception : le retraitement du combustible épuisé joue un rôle important en ce qu'il se substitue à son élimination pure et simple et en atténue ainsi l'impact radiologique. En matière de retraitement, la tendance dominante, à Sellafield en particulier, est à la recherche d'un meilleur rendement des opérations.

Radioexposition et radioprotection. Curieusement, la nette évolution de la contamination radioactive et les possibilités de contrôler la radioexposition n'ont eu que peu d'influence sur les options essentielles de la radioprotection et les spécialistes de cette discipline se sont paradoxalement intéressés davantage à l'énergie nucléaire, négligeant en fait les risques bien plus sérieux associés à d'autres sources de rayonnement.

Vu les variations considérables des niveaux de radioactivité et les possibilités de réduire les expositions de toutes origines, il est regrettable que les radioprotectionnistes en aient tenu si peu compte en fixant leurs priorités.

En principe, il existe des normes de radioprotection applicables aux expositions professionnelles résultant de toutes les applications de l'énergie nucléaire. Ces normes sont strictement appliquées dans l'industrie nucléaire qui compte parmi son personnel des radioprotectionnistes hautement qualifiés. Un tel souci de la protection radiologique ne se rencontre généralement pas dans d'autres secteurs, à l'exception des hôpitaux modernes particulièrement bien équipés. Malgré cela, l'exposition professionnelle du personnel des installations nucléaires est supérieure d'environ un ordre de grandeur aux niveaux enregistrés dans d'autres branches, telle la médecine nucléaire. Il faut cependant être prudent quand on interprète les chiffres. N'oublions pas que les installations nucléaires tiennent un fichier radiologique systématique et que des systèmes très perfectionnés de contrôle de l'exposition du personnel sont appliqués tout au long du cycle du combustible. Cette organisation est unique en son genre.

Réduire ou non les doses: un choix à faire. En matière de radioexposition, il arrive souvent qu'un choix s'impose: on opte pour la dose de rayonnement relativement élevée qu'implique la tomographie informatisée, par exemple, ou bien on accepte le risque de ne pas détecter et donc de ne pas traiter le mal. Un dilemme du même ordre se pose aux médecins: on réduit la dose absorbée, soit, et c'est un avantage, mais la radiographie sous-exposée que l'on ne peut interpréter ne sert à rien.

Au niveau de la collectivité, chercher à éviter ou à réduire pour le principe les radioexpositions n'est pas nécessairement l'idéal dans une société dynamique en expansion démographique et économique, où l'on vit plus longtemps, où l'on aspire à améliorer la qualité de la vie, et cela dans le monde entier. Au cours des

30 prochaines années, la population mondiale augmentera à un rythme encore jamais vu, passant des cinq milliards actuels à un peu plus de huit milliards en 2015. La tendance à l'urbanisation se confirme partout et la proportion des citadins atteindra 57% de la population en 2015, alors qu'elle n'est que de 30% aujourd'hui. De tout temps, les habitants des villes ont été favorisés en matière de services médicaux par rapport aux populations rurales. Le vieillissement de la population que l'on constate depuis peu, en particulier dans les pays avancés, se traduit nécessairement par une plus forte demande de soins. Alors que la population de la planète comptait en 1980 quelque 380 millions de personnes de 60 ans et plus, l'effectif de ce groupe d'âge sera de 607 millions en l'an 2000 et approchera de 1,2 milliard en 2025.

Le développement économique et social exige de l'énergie, en particulier de l'électricité. L'énergie nucléaire et le charbon sont des options viables pour répondre à cette forte demande, mais ces deux sources impliquent une radioexposition. Le consommateur industriel et le particulier renoncent progressivement au pétrole en faveur de l'électricité, non seulement pour jouir d'une plus grande indépendance énergétique, mais aussi à cause des avantages économiques que présente le haut rendement de l'électricité au point d'utilisation. L'apport des autres combustibles fossiles et des sources d'énergie renouvelables n'est pas négligeable mais, pour la plupart des pays, l'énergie nucléaire et le charbon demeurent les options les plus sûres pour répondre à la demande.

L'accroissement prévu de la puissance nucléoélectrique installée élèvera les niveaux de radioexposition. On peut supposer à juste titre que cette radioexposition ne représentera, tout comme maintenant, qu'une faible proportion du rayonnement ambiant. En revanche, l'utilisation accrue du charbon pour produire de l'électricité implique non seulement une augmentation de la radioexposition, mais aussi une aggravation des mille dangers auxquels l'emploi des combustibles fossiles expose l'environnement.

Doses de rayonnement

Dose absorbée: Quantité d'énergie communiquée par un rayonnement ionisant à un gramme de tissu. L'unité de dose absorbée est le gray (Gy).

Equivalent de dose: C'est la dose absorbée pondérée de façon à tenir compte des différents types de rayonnement ionisant et de leurs énergies. Les unités d'équivalent de dose sont le sievert (Sv) et ses sous-multiples, le millisievert (mSv) et le microsievert (μSv), etc. Dans la pratique, la pondération est généralement égale à l'unité, c'est-à-dire qu'un sievert égale un gray.

Equivalent de dose efficace: C'est l'équivalent de dose pondéré pour tenir compte de la sensibilité des différents organes du corps humain à l'irradiation. Comme il s'agit toujours d'un équivalent de dose, simplement modifié, il s'exprime également en sievert.

Equivalent de dose efficace collectif: C'est l'équivalent de dose efficace reçu par un groupe de personnes exposées à une source de rayonnement. L'unité est l'homme-sievert (homme-Sv).

Note: Dans la pratique, ces quantités s'expriment en débits (par exemple, mSv/heure ou homme-Sv par an). Si les débits sont cumulés dans le temps, leur somme est généralement appelée l'engagement de dose. Sauf indication contraire, l'engagement de dose est calculé pour une période théoriquement infinie; en d'autres termes, c'est la somme de toutes les doses reçues par tous les individus (présents et futurs à perpétuité) et résultant d'une pratique ou d'une action faisant intervenir des rayonnements.