

Risques sanitaires entraînés par l'utilisation de l'énergie nucléaire pour la production d'électricité

par M. Tubiana

De nombreux travaux ont, au cours de ces dernières années, tenté de comparer les risques sanitaires causés par les différentes méthodes de production d'énergie. L'objet de cet article est:

- 1) de rappeler les données sur lesquelles se base l'évaluation des effets biologiques des radiations ionisantes,
- 2) d'évaluer les doses qui sont délivrées au public et aux travailleurs du fait de la production d'électricité d'origine nucléaire,
- 3) d'examiner quelles peuvent être les conséquences biologiques de ces irradiations tant pour le public que pour les travailleurs, à la fois sur le plan de l'irradiation externe et de la contamination interne.

Données sur lesquelles se base l'évaluation des effets

On dit souvent que les effets des rayonnements ionisants sur l'homme sont mystérieux et imprévisibles. En réalité, de tous les agents physiques et chimiques présents dans notre environnement, les rayonnements sont certainement le mieux connus. Les rayons X ont été découverts par Roentgen en 1895, la radioactivité naturelle par Becquerel en 1896, et presque immédiatement on s'est aperçu que ces rayonnements avaient un effet sur l'homme. Le premier cancer provoqué par les rayonnements fut observé en 1902. La première expérience ayant démontré la possibilité de provoquer un cancer chez l'animal date de 1910. L'effet mutagène des rayons X est connu depuis 1925.

Ainsi, dès le début du XXe siècle, on connaissait les effets biologiques des rayonnements ionisants, depuis ceux provoqués par des doses de plusieurs milliers de rems (6000 à 7000 rems) utilisées pour le traitement des cancers jusqu'à ceux induits par l'accumulation de faibles doses. Devant le danger potentiel des rayonnements ionisants, on avait consacré à ces derniers des recherches d'autant plus importantes que simultanément l'usage des rayonnements ionisants chez l'homme avait pris un développement rapide en raison de ses

M. Tubiana est Professeur à la Faculté de médecine de Paris-Sud et Directeur de l'Institut de radiologie clinique de l'INSERM (Institut national de la santé et de la recherche médicale).

RISQUES INHERENTS AUX DIFFERENTES SOURCES D'ENERGIE

applications médicales (radiodiagnostic et radiothérapie). Or les premières victimes des rayonnements ionisants étaient précisément les physiciens et les médecins qui les étudiaient et essayaient de les perfectionner.

Le sentiment de culpabilité et d'inquiétude qu'Hiroshima et Nagasaki avaient provoqué dans l'ensemble de la communauté scientifique explique qu'après 1945 l'étude des effets des rayonnements ionisants sur l'homme ait pris une dimension plus vaste encore. C'est, depuis, par milliards de dollars que peuvent se chiffrer les études sur les effets biologiques des rayonnements ionisants.

Il n'est qu'en apparence paradoxal que l'étendue de ces recherches ait suscité des inquiétudes. Il est, en fait, compréhensible qu'on ait craint que leur importance ne soit causée par la gravité des dangers. De plus, comme les autres modes de production d'énergie (charbon, pétrole) s'étaient développés à un moment où l'on prêtait moins d'attention aux risques sanitaires et où l'on ignorait d'ailleurs certains d'entre eux, tels les risques mutagènes ou cancérigènes, il en avait résulté une tendance à les minimiser. Il est donc normal que comme les risques des rayonnements ont été les premiers à être soulignés et chiffrés par les promoteurs mêmes de l'énergie nucléaire, l'attention se soit focalisée sur eux, d'autant que jusqu'à ces dernières années les rayonnements ionisants étaient, de tous les agents toxiques, ceux dont la détection est la plus facile grâce à la haute précision et à l'extraordinaire sensibilité des appareils de mesure.

En raison de l'intérêt apporté par les radiobiologistes à la radioprotection et des efforts qui ont été effectués pour quantifier les risques et développer les méthodes de dosimétrie, de l'avis de tous les hygiénistes, la radioprotection constitue un modèle dont devrait s'inspirer la lutte contre tous les agents potentiellement nocifs. On pourrait, pour souligner l'avance des radiotoxicologues sur les autres hygiénistes, rappeler que ce n'est que 50 ans après la création de la CIPR qu'a été créée une commission équivalente pour les substances chimiques cancérigènes et mutagènes.

Outre les recherches expérimentales, nos connaissances actuelles sur les effets tardifs des rayonnements ionisants chez l'homme sont le fruit de l'étude de populations exposées à des doses connues de rayonnements et sur lesquelles les conséquences d'une irradiation ont été étudiées scientifiquement. Il s'agit notamment de plusieurs dizaines de milliers de malades traités par des rayons X ou des radioisotopes pour des affections bénignes, de plusieurs groupes de travailleurs (ouvriers qui peignaient des cadrans lumineux avec une peinture au radium, radiologistes, mineurs dans des mines d'uranium, etc.) et des 285 000 survivants d'Hiroshima et Nagasaki qui ont été suivis depuis 1945 par une équipe de 500 spécialistes créée conjointement par le Japon et les Etats-Unis.

De nombreux congrès et colloques ont fait le bilan de ces recherches et plusieurs comités d'experts nationaux ou internationaux ont analysé l'ensemble des connaissances acquises dans ce domaine. Citons notamment le rapport de 1977 du Comité des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR) qui est un document de plus de 700 pages, et les rapports de l'Académie nationale des sciences des Etats-Unis. De plus, dès 1928, donc longtemps avant le début de l'utilisation de l'énergie nucléaire, des groupes de spécialistes, médecins radiologistes et physiciens s'étaient réunis pour discuter à la fois des risques des rayonnements ionisants et des précautions propres à limiter ceux-ci et avaient fondé la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) dont les premières recommandations ont été publiées en 1928. Depuis cette date, la CIPR a régulièrement mis à jour ses recommandations en se basant sur toutes les données scientifiques les plus

RISQUES INHERENTS AUX DIFFERENTES SOURCES D'ENERGIE

Tableau 1. Principales sources d'irradiation en France

Sources: UNSCEAR 1977 et Rapport de la National Academy of Sciences (Washington 1980)

IRRADIATION NATURELLE	Dose moyenne (mrem/an)	Variations en France (Région Parisienne)
Rayons cosmiques	30	100 à 2500 m d'altitude
Radioactivité sol	46	200 dans les régions granitiques
Radioéléments naturels incorporés dans organisme (⁴⁰ K, Ra, Th, etc.)	24	200 dans les régions où l'eau est riche en radioactivité
	100	250 à 300 en Bretagne, Massif Central, etc.
IRRADIATION ORIGINE HUMAINE	Valeur moyenne rapportée à l'ensemble de la population (en mrem/an)	
Radiologie médicale	100 ¹	Ecarts individuels considérables selon l'âge et la fréquence des examens radiologiques
Dose due en 1977 aux retombées des essais nucléaires aériens (effectués essentiellement en 1956-1962)	5	
Voyages aériens	0,1	Ecarts individuels considérables: atteignant 250 à 500 pour les équipages d'avions
Production d'énergie nucléaire (sources d'irradiation externe et contamination interne) en 1976	0,15	Petites variations en fonction des lieux d'habitation, atteint 4 mrem pour les personnes vivant à proximité d'une centrale

¹ Cette valeur a été calculée aux Etats-Unis. En France, le chiffre est sans doute voisin d'après les données du Service central de protection contre les radiations ionisantes et du Ministère de la Santé. La valeur moyenne pour l'ensemble de la population du globe est 20 mrem/an.

RISQUES INHERENTS AUX DIFFERENTES SOURCES D'ENERGIE

Tableau 1 (suite)

IRRADIATION ORIGINE HUMAINE	Valeur moyenne rapportée à l'ensemble de la population (en mrem/an)	Variations en France
Dose prévue en l'an 2000	2	
Montres à cadran lumineux	0,50	Atteint 10 pour les personnes portant régulièrement certains types de montres lumineuses
Divers (engrais phosphaté, télévision, combustion charbon, etc.)	1	
TOTAL irradiations autres que médicales ou militaires, environ	4	

récentes. Celles-ci ont toujours été acceptées par tous les pays et le rôle de la CIPR est universellement reconnu. Elle a publié en 1977 son 26ème rapport. Il faut souligner de plus que tous ces groupes d'experts ont abouti à des conclusions voisines et, contrairement à l'impression qu'a quelquefois le public, il n'y a que peu de divergences parmi les spécialistes sur la nature et l'importance des effets biologiques causés par les rayonnements.

Doses auxquelles peuvent être exposés le public et les travailleurs

Tout individu se trouve exposé, du fait de sa présence à la surface de la terre, aux rayonnements cosmiques et aux rayonnements émis par les corps radioactifs naturels (radium et thorium), et la dose moyenne est de l'ordre de 100 millirems par an à l'altitude de la mer. Cependant cette dose varie considérablement d'un point à l'autre du globe. En France, par exemple, elle est de l'ordre de 100 millirems par an dans la région parisienne, mais atteint, dans les régions de haute altitude (Alpes) ou dont le sol est granitique, 200 à 300 millirems. En plusieurs régions du globe des doses de 500 ou de 600 millirems par an sont observées.

A côté de cette irradiation naturelle, il y a d'autres sources d'irradiation (voir tableau 1). La plus importante des sources d'irradiation d'origine humaine est l'utilisation médicale des rayonnements ionisants, essentiellement le radiodiagnostic qui, en moyenne, délivre à tous les habitants du globe une dose de l'ordre de 20 millirems par an. Cependant, dans certains pays comme les Etats-Unis ou la France, cette dose moyenne atteint 50 ou même 100 millirems par an.

Vis-à-vis de cela, que représente le nucléaire? En 1976, d'après le rapport du Comité scientifique des Nations Unies, il délivrait 0,15 millirem par an, soit donc environ 600 fois

RISQUES INHERENTS AUX DIFFERENTES SOURCES D'ENERGIE

moins que l'irradiation naturelle; autrement dit, la dose due à l'énergie nucléaire représentait en moyenne de l'ordre d'une demi-journée de la dose due à la radioactivité naturelle. En France, la dose due à l'irradiation nucléaire en 1976 représentait l'équivalent du surcroît de dose qui résulte pour un parisien d'une demi-journée passée en Bretagne ou dans le Massif Central.

En l'an 2000, l'UNSCEAR donne comme fourchette 2 à 4 millirems par an, si 60% de l'énergie électrique produite est alors d'origine nucléaire, ceci en y incluant aussi bien l'extraction et le traitement de l'uranium que le fonctionnement des piles, les déchets, la pollution de l'air, de l'eau, des aliments, et en tenant compte des concentrations éventuelles le long de la chaîne alimentaire et de la fixation de corps radioactifs dans l'organisme humain qui peut en résulter. Ainsi, pour un Parisien, ceci représentera l'équivalent d'une ou deux semaines de séjour dans le Massif Central ou en Bretagne.

Or, contrairement à ce qui a parfois été dit, aucune différence significative de la fréquence des cancers ou des malformations génétiques n'a été décelée entre les régions exposées à des doses différentes d'irradiation naturelle.

En ce qui concerne les travailleurs, les doses qu'ils reçoivent dans les installations électro-nucléaires sont, dans tous les pays, connues avec précision. Nous donnerons à titre d'exemple le tableau 2, extrait du dernier rapport de l'Académie des sciences des Etats-Unis. L'ordre de grandeur des doses est voisin pour d'autres pays, en particulier la France. Comme on le voit, ces doses sont, en moyenne, notablement inférieures à la limite indiquée par la CIPR (5 rems/an). Il faut de plus observer que l'irradiation des travailleurs ou la contamination du public due aux réacteurs à neutrons rapides (surgénérateurs) sera, pour un même nombre de kw/h produits, plus faible que celle due aux réacteurs classiques à neutrons lents.

Effets biologiques de faibles doses

On doit distinguer plusieurs types d'effets biologiques des rayonnements ionisants. Le premier correspond aux effets immédiats ou différés sur les tissus irradiés: par exemple lésions de la peau, baisse de la fécondité et stérilité, cataractes ou diminution de la croissance des sujets irradiés pendant l'enfance. Lorsque les doses sont assez élevées (au-dessus d'un seuil de quelques centaines ou milliers de rads), ces effets sont observés chez tous les sujets irradiés et leur gravité augmente avec la dose. Inversement, si la dose est faible, aucun effet n'est décelable; il existe donc une dose seuil au-dessous de laquelle aucun effet n'est observé. Celle-ci varie avec l'effet et le volume de tissu irradié; elle est toujours supérieure à quelques dizaines de rems par an.

Pour deux autres types d'effets biologiques, d'une part l'induction de cancer, et d'autre part les mutations génétiques, la relation entre la dose et l'effet est très différente. Ce qui varie en fonction de la dose est non pas l'effet biologique lui-même, qui demeure identique quelle que soit la dose, mais la probabilité de cet effet; en d'autres termes, le pourcentage de sujets irradiés chez qui l'on observe cet effet augmente avec la dose mais l'effet ne varie pas.

Par exemple, un cancer est toujours un cancer, qu'il apparaisse spontanément ou qu'il ait été provoqué par les rayonnements, et il n'y a aucun moyen de distinguer l'un de l'autre. La seule façon de mettre en évidence l'induction de cancers chez les sujets irradiés est de

RISQUES INHERENTS AUX DIFFERENTES SOURCES D'ENERGIE

Tableau 2. Irradiations professionnelles

(Aux Etats-Unis d'après le rapport de la National Academy of Sciences, Washington 1980)

	Dose moyenne (mrem/an)
200 000 travailleurs radiologie médicale (médecins et techniciens)	300 à 350
200 000 travailleurs radiologie dentaire (dentistes, techniciens)	50 à 125
100 000 travailleurs usages médicaux isotopes radioactifs (médecins, techniciens)	260 à 540
30 000 travailleurs centrales électro-nucléaires et réacteurs civils	600 à 800
35 000 travailleurs réacteurs nucléaires pour propulsion navires (sous-marins, etc.)	130 à 330
100 000 travailleurs recherche et développement (centres de recherche civils, universités, etc.)	130 à 330

montrer que chez eux la fréquence des cancers est statistiquement plus élevée que dans un groupe de sujets de mêmes âge et sexe n'ayant pas été irradiés.

Les effets génétiques ont ce même caractère probabiliste ou, comme disent les spécialistes, stochastiques, sans que rien ne distingue les mutations radio-induites des mutations naturelles.

Dans ces 2 cas, à la notion de seuil se substitue donc celle d'un risque variable avec la dose, très faible pour de petites doses et croissant avec celles-ci.

Alors que les premières recommandations de la CIPR avaient été basées sur les effets somatiques non stochastiques des rayonnements et l'existence d'un seuil, à partir du début des années 50, on accorda une plus grande attention au pouvoir cancérigène des faibles doses. Il apparut alors clairement que les effets aléatoires sans seuil — à savoir la cancérogénèse ou la mutagénèse — étaient les risques qu'il fallait considérer en priorité après une exposition à de faibles doses d'irradiation. Les spécialistes de la radioprotection mirent donc l'accent sur l'évaluation de ces risques.

Ce n'est pas là une situation unique et dans de nombreux domaines de l'hygiène et de la médecine du travail il en a été de même; pour l'amiante, par exemple, la protection a suivi la même évolution. Au début, l'asbestose était considérée comme le principal danger; l'objectif de la médecine du travail était de ramener l'exposition à la poussière d'amiante à un niveau inférieur à celui qui provoquait cette maladie. Plus tard, on découvrit que lorsque les conditions de travail étaient meilleures et que les travailleurs ne souffraient plus

RISQUES INHERENTS AUX DIFFERENTES SOURCES D'ENERGIE

d'asbestose, ils vivaient plus vieux et l'on constatait alors chez eux un risque d'apparition de cancers du poumon et de la pleurite légèrement plus élevé que dans la population en général. Il fallait donc établir les mesures de protection en tenant compte de la relation entre la concentration d'amiante dans l'air et la probabilité d'apparition d'un cancer.

L'évolution de la radioprotection, basée initialement sur les lésions qui apparaissent chez tous les sujets irradiés, puis sur la probabilité d'un risque extrêmement grave mais qui n'atteint qu'une très faible proportion de sujets irradiés, est donc une tendance fréquente dans la médecine du travail et une conséquence de l'amélioration des conditions générales de travail.

EVALUATION DU RISQUE DE CANCER

Pour chiffrer les effets cancérogènes des rayonnements, on s'est servi de plusieurs enquêtes sur les populations de sujets irradiés: en premier lieu, les études prolongées et minutieuses sur les survivants de la bombe A. Sur les 285 000 survivants enregistrés à Hiroshima et Nagasaki, 80 000 sont décédés de mort naturelle entre 1950 et 1978. On estime qu'approximativement 400 à 500 de ces morts ont été dues à un cancer radio-induit. Sur les 1200 survivants ayant reçu les doses les plus fortes (dose moyenne de 330 rads, soit une dose très voisine de la dose mortelle lorsqu'elle est délivrée à l'ensemble de l'organisme et que l'on situe entre 350 et 450 rads environ), l'augmentation de la fréquence des leucémies entre 1950 et 1974 était de 1%. Ainsi, l'effet cancérogène est indubitable mais, en termes absolus, le nombre des survivants atteints est relativement petit et ne modifie pas de façon notable le taux de survie globale de la population ayant été exposée à la bombe A.

Notons à ce propos que les études effectuées sur les survivants n'ont mis en évidence aucune maladie particulière due à l'irradiation, hormis les opacités cristalliniennes et un retard du développement staturo-pondéral chez les enfants exposés très jeunes. On n'a, en particulier, observé ni d'augmentation de la morbidité, ni une quelconque accélération du processus de vieillissement, ni un raccourcissement de la durée de vie en dehors de celui qui est directement lié à la fréquence accrue des cancers. Rien ne permet de dire, comme certains le font parfois, que les estimations basées sur les survivants sont entachées d'erreurs en raison d'une mortalité élevée des survivants au cours des premières années qui aurait eu pour résultat que seuls auraient survécu durablement les sujets les plus résistants.

La dose reçue par chacun des survivants a été déterminée en tenant compte notamment de la distance à laquelle celui-ci se trouvait par rapport à l'hypocentre au moment de l'explosion. Toutefois, la nature des rayonnements reçus par les habitants des deux villes est différente. La bombe d'Hiroshima était composée d'uranium 235; un tiers environ de l'irradiation a été due à des neutrons et le reste à des rayons gamma. Comme l'efficacité biologique relative (EBR) des neutrons est d'environ 10, 80% de l'effet biologique a été dû aux neutrons. En revanche, à Nagasaki, la bombe, en plutonium 239, était de conception différente et libérait presque uniquement des rayons gamma. Cette différence justifie une analyse séparée des données relatives à Hiroshima et Nagasaki et leur comparaison informe directement sur les effets cancérogènes relatifs des neutrons et des photons sur l'homme.

Dans ces deux villes, l'effet cancérogène des rayonnements se manifesta d'abord par une augmentation du nombre des leucémies à la fin des années 40. Après être passé par un pic

RISQUES INHERENTS AUX DIFFERENTES SOURCES D'ENERGIE

en 1952–1970, le taux de leucémie ne cessa de diminuer cependant qu'augmentait la fréquence des tumeurs solides radio-induites, essentiellement de la thyroïde, du sein et des poumons. La période de latence entre le moment de l'exposition et l'apparition du cancer varie selon la nature de la tumeur et l'âge du sujet au moment de l'exposition: pour les leucémies aiguës elle est de 5 à 10 ans chez des sujets ayant été irradiés dans leur enfance, et de 10 à 15 ans chez ceux irradiés à l'âge adulte. Pour les tumeurs solides, le temps de latence varie entre 15 et 30 ans et il peut être encore plus long dans le cas des cancers des voies digestives.

On a constaté d'autre part que l'effet cancérigène varie en fonction de l'âge. Pour de nombreux cancers le risque relatif est plus élevé chez les sujets exposés avant l'âge de 20 ans. Le taux de leucémie aiguë est plus élevé chez des sujets irradiés à moins de 10 ans ou à plus de 50 ans. En ce qui concerne le cancer du sein, le risque relatif est maximal chez des femmes âgées de 10 à 19 ans au moment de l'irradiation.

Jusqu'en 1975, les leucémies représentaient environ un tiers des tumeurs malignes. Elles offraient donc le meilleur échantillon pour une étude quantitative des effets cancérigènes. A Nagasaki, la fréquence des leucémies n'est pas augmentée chez les sujets ayant reçu moins de 100 rads et ne devient supérieure à celle observée chez le groupe non irradié que chez le groupe de sujets ayant reçu plus de 100 rads. Au-delà de cette dose, la fréquence des leucémies augmente avec la dose. L'excès de fréquence des leucémies observée chez les survivants de Nagasaki correspond à un taux d'induction d'environ 20 à 30 leucémies pour 10 000 sujets ayant reçu 100 rads ou rems. Chez les survivants d'Hiroshima, le taux d'induction semble plus élevé; il ne semble pas exister de seuil et la fréquence est déjà augmentée chez les sujets ayant reçu plus de quelques dizaines de rads (soit donc plus d'une centaine de rems).

Examinons maintenant la deuxième source d'informations, c'est-à-dire les sujets ayant été irradiés pour une affection bénigne. L'une des maladies pour lesquelles on a le plus irradié de malades est une forme particulière de rhumatisme, la spondylarthrite ankylosante. Une enquête a été effectuée en Angleterre sur environ 20 000 sujets ayant été traités par radiothérapie pour cette maladie par des doses de quelques centaines de rads. Aucun effet n'a été observé chez les sujets ayant reçu moins de 300 rads. En revanche, pour des doses plus élevées, la fréquence augmente avec la dose. Le nombre de leucémies observées parmi les malades est environ 10 fois plus grand que celui auquel on se serait attendu étant donné l'âge et le sexe des personnes irradiées. Outre cet excès de leucémies, un excès beaucoup plus faible mais statistiquement significatif de différents autres cancers a également été observé. On a, de même, observé un excès de leucémies ou de cancers chez différents groupes de malades traités pour d'autres affections bénignes; par contre, on n'en a pas observé dans d'autres enquêtes sur diverses maladies (cancers du col de l'utérus traités par le radium, hyperthyroïdies traitées par l'iode radioactif, etc.).

Une troisième source d'informations est fournie par l'observation des sujets ayant été irradiés pour des raisons professionnelles. Parmi ces sujets, je ne prendrai qu'un exemple, celui des médecins radiologistes qui constituent sans doute le groupe de travailleurs ayant reçu les doses les plus élevées. En étudiant ceux qui ont exercé entre 1920 et 1939, donc à une époque où l'on ne connaissait pas encore très bien les dangers des rayonnements ionisants et où l'on ne prenait pas les précautions prises aujourd'hui, on a observé que la fréquence des leucémies chez eux a été environ 10 fois plus grande que celle constatée chez les médecins qui n'utilisaient pas les rayonnements, tels les médecins ORL; la

RISQUES INHERENTS AUX DIFFERENTES SOURCES D'ENERGIE

fréquence chez les généralistes qui effectuaient fréquemment des radioscopies est intermédiaire.

Il est intéressant de signaler que chez les radiologistes ayant exercé après 1946, donc à un moment où l'on connaissait mieux l'effet des rayonnements ionisants, on n'a observé aucune augmentation de la fréquence de leucémie, sans doute parce que les médecins et les manipulateurs, comme d'ailleurs de façon générale tous les travailleurs exposés aux rayonnements ionisants, respectaient les normes de la Commission internationale de protection radiologique, ce qui montre l'intérêt et l'efficacité de ces recommandations.

Au total, les données numériques de ces différentes études concordent de façon satisfaisante. On observe dans les 3 cas des incidences voisines, en exprimant les résultats par 10 000 personnes irradiées ayant reçu 100 rems, ou par million de personnes irradiées par 1 rem, ce qui est quantitativement la même chose. Remarquons que cette dernière expression est artificielle puisqu'aucun effet n'a été observé chez les sujets ayant reçu moins de 100 rems, mais elle est, néanmoins, celle qui est la plus fréquemment utilisée dans les rapports internationaux pour des raisons de simplicité. Ainsi, par exemple, pour 10 000 sujets ayant reçu 100 rems, on devrait observer environ 30 cas de leucémies en prenant pour base les observations faites sur les survivants d'Hiroshima et Nagasaki. En prenant pour base les observations effectuées sur les malades atteints de spondylarthrite ankylosante, on n'en observerait que 12, mais, dans ce cas, il n'y avait que 40% des tissus hématopoïétiques, c'est-à-dire de la moelle osseuse, qui étaient irradiés. En tenant compte de ce pourcentage de moelle irradiée, on retrouve pour une irradiation totale à peu près le même chiffre que pour les survivants d'Hiroshima et Nagasaki. Enfin, pour les radiologistes, l'évaluation de l'effet leucémogène est beaucoup plus difficile car on ignore la dose qu'ils avaient reçue. Pour tenter de l'évaluer, on peut se baser sur l'appareillage utilisé, le nombre d'exams radiologiques effectués par jour, la durée d'exercice, etc. On aboutit ainsi à des évaluations variant entre 400 et 2000 rads. Si l'on prend pour base de calcul la limite supérieure de cette fourchette, cela correspondrait à 10 cas par million et par rad. Si l'on se base sur la limite inférieure de la fourchette, on aboutit à 50 cas par million et par rad. On encadre donc bien les 30 cas par million et par rad observés à Hiroshima et Nagasaki ou sur les malades traités pour spondylarthrite ankylosante, pour lesquels l'évaluation des doses est plus précise. L'ensemble des données est donc cohérent et suggère que pour les leucémies une irradiation chronique pourrait garder une efficacité voisine de celles effectuées en un temps plus court.

Nous n'avons considéré jusque-là que les leucémies car ce sont les cancers les plus fréquemment observés chez les sujets irradiés, mais bien entendu les autres cancers ont fait l'objet d'études aussi attentives. Par exemple, à Nagasaki, aucune augmentation significative de la fréquence des autres cancers n'a été constatée pour des doses inférieures à 100 rads. Par contre, pour des doses supérieures à 100 rads, l'augmentation est statistiquement significative.

La susceptibilité des différents tissus ou organes à un cancer radio-induit est très variable; pour certains tissus, il faut atteindre des doses très élevées de plusieurs milliers de rads pour provoquer des cancers chez 1% des sujets irradiés; pour d'autres, un même effet est obtenu avec des doses dix fois moindres. Parmi les tissus les plus radiosensibles, citons en particulier la thyroïde, le sein, les poumons, la moelle osseuse. Pour tous ces cancers, différentes enquêtes fournissent des estimations qui paraissent concordantes dans les limites de précision des études effectuées. Plusieurs études ont comparé la fréquence de

RISQUES INHERENTS AUX DIFFERENTES SOURCES D'ENERGIE

l'ensemble des tumeurs malignes par rapport à celle des seules leucémies; ce rapport varie de 3 à 5. Sachant que le risque de leucémie se situe aux alentours de 2 pour mille pour 100 rems, le risque total de cancer devrait être de l'ordre de 1 pour cent pour 100 rems. Cette estimation concorde assez bien avec celle obtenue en additionnant les risques pour chaque tissu et c'est à cette évaluation que parviennent les rapports du Comité scientifique des Nations Unies ou la CIPR.

Cependant, il faut y revenir car c'est fondamental, ces évaluations sont basées sur des irradiations par rayons X ou gamma à des doses supérieures à un centaine de rems. Or, 100 rems est déjà une dose considérable, très supérieure à celle que peuvent recevoir les travailleurs exposés aux rayonnements de par leur profession. Pour des doses plus faibles, même si l'on ne peut pas exclure la possibilité d'un effet, aucune donnée ne permet d'évaluer la grandeur du risque car celui-ci est trop faible pour être estimé directement. En effet, bien que certains résultats suggèrent que des doses modérées de rayons X – quelques dizaines de rads – provoquent des cancers, on ne peut pas, compte tenu de l'importante incertitude statistique liée aux données pour de tels niveaux d'irradiation, se fier à ces résultats pour évaluer la fréquence d'induction après de telles doses.

Certaines enquêtes ont cru observer une augmentation de la fréquence des leucémies et/ou d'autres tumeurs malignes chez des adultes ayant reçu de faibles doses au cours de leurs occupations professionnelles ou pendant des examens radiologiques. Parmi ces études, la plus connue est celle de Mancuso, Stewart et Kneale.

Ces auteurs ont analysé les causes de décès de 2184 travailleurs exposés aux rayonnements et de 1336 travailleurs non exposés de la centrale atomique de Hanford (Etats-Unis), et ont conclu que les sujets morts de cancers avaient reçu des doses plus élevées que les autres travailleurs. Ils en déduisirent que le risque cancérigène des rayonnements était plus élevé qu'on ne le pensait jusque là. Une seconde analyse basée sur 4033 décès, et aboutissant pourtant à des différences plus faibles, leur parut confirmer la première. Cependant, en reprenant ces mêmes données sur la mortalité des travailleurs à Hanford, d'autres chercheurs aboutissent à des conclusions totalement opposées. De plus, l'enquête de Mancuso et col. a été critiquée sur le plan statistique par de nombreux auteurs et comités d'experts. En particulier, ceux-ci estiment que, vraisemblablement, les écarts rapportés pour certains cancers sont dus à des fluctuations statistiquées liées à la trop faible taille de la population. Ce défaut est aggravé par le découpage des cas de cancer en un trop grand nombre de sous-groupes. Il n'est en effet pas surprenant que si l'on recherche des variations de la fréquence des cancers dans un grand nombre de petites populations, on puisse observer, pour certaines d'entre elles et pour certains cancers, une différence statistique apparemment significative mais en réalité dénuée de sens.

Il semble aujourd'hui peu probable que ce type d'investigation puisse apporter des éclaircissements sur les effets des faibles doses d'irradiation. En outre, les calculs présentés dans le rapport du Comité des Nations Unies montrent que, à moins que les estimations actuelles du taux d'induction total de cancer ne soient grossièrement erronées, il faudrait effectuer des enquêtes portant sur des travailleurs soumis à des doses annuelles moyennes sur l'organisme entier de plus d'un rad pendant des millions d'homme-ans pour pouvoir évaluer directement le risque de cancer consécutif à ces doses. Il y a donc peu d'espoir de parvenir dans un avenir proche à recueillir des données fiables sur les effets des faibles doses.

RISQUES INHERENTS AUX DIFFERENTES SOURCES D'ENERGIE

Evaluation du risque de faibles doses et la relation dose-effet

Pour évaluer le risque dû aux doses auxquelles les travailleurs ou la population sont exposés, on est donc obligé de faire une extrapolation très importante puisqu'il s'agit d'évaluer le risque causé par des doses environ 100 fois ou 10 000 fois plus faibles que celles pour lesquelles on dispose de données fiables. Une extrapolation d'une telle amplitude nécessite que l'on connaisse avec une précision suffisante la forme de la courbe, c'est-à-dire la fonction qui relie la dose et l'effet.

L'hypothèse la plus pessimiste, c'est-à-dire celle qui prédit le plus grand nombre de cancers, est la relation linéaire sans seuil. Elle consiste à admettre que si une dose de 200 rems délivrée à 10 000 sujets provoque 200 cancers, une dose de 1 rem provoquera 1 cancer. Une telle relation s'observe rarement en pharmacologie. Pour la plupart des médicaments ou des toxiques (par exemple l'alcool), l'effet de faibles doses est proportionnellement très faible ou nul. Il est vraisemblable que cette relation conduit donc à une évaluation par excès du risque éventuel. Cependant d'autres hypothèses sur la relation dose-effet sont plausibles et, pour choisir celle d'entre elles qui est la plus adéquate, on peut faire appel à diverses sources d'informations.

La première consiste à analyser les données d'origine humaine. Chez les survivants de Nagasaki ayant été exposés à une dose moyenne de 350 rads, la probabilité de radiocarcinome est de 35 par million de sujets et par rad. Si la relation dose-effet était linéaire, la probabilité par rad devrait être inchangée pour les sujets ayant été exposés à 100 rads. En réalité l'effet par rad est presque moitié moindre, ce qui signifie qu'entre 100 rads et 350 rads la relation n'est sûrement pas linéaire. Cette diminution de l'efficacité en fonction de la dose suggère donc fortement, mais sans le prouver, que la relation dose-effet chez les survivants de Nagasaki n'est pas linéaire mais est plutôt une fonction de puissance (de type $y = bx^n$). Pour des doses inférieures à 100 rads, aucune augmentation de la fréquence des leucémies n'a été observée et la fréquence observée est même légèrement inférieure à la normale, mais la différence n'est pas statistiquement significative. Il faut cependant noter que bien qu'une relation linéaire cadre moins bien avec les données, elle ne peut pas être totalement exclue.

Au contraire, pour les sujets irradiés à Hiroshima, chez qui l'effet leucémogène est dû aux neutrons, la relation dose-effet semble linéaire, autrement dit la fréquence des leucémies est proportionnelle à la dose de neutrons.

Cette discordance entre les formes de relation dose-effet pour les rayons X et pour les neutrons est conforme aux effets observés expérimentalement sur les cellules ainsi qu'aux prévisions théoriques. Sans entrer dans le détail de celles-ci, disons qu'il est logique que pour les particules fortement ionisantes (tels les neutrons), l'effet soit proportionnel à la dose parce qu'une seule particule a une très forte probabilité de créer dans le noyau d'une cellule des lésions très graves (rupture des deux chaînes de la molécule d'acide désoxyribonucléique). Dans ce cas, on attend donc un effet proportionnel à la dose, c'est-à-dire une relation linéaire ($N = \alpha D$).

Au contraire, avec des particules faiblement ionisantes, comme des rayons X ou gamma, les transferts d'énergie sont beaucoup plus petits et les lésions créées par le passage de chaque particule sont beaucoup moins graves et facilement réparables sauf s'il y a passage quasi simultané de 2 ou plusieurs particules dans la même région du noyau cellulaire (pour rompre les deux chaînes de la molécule de DNA, il faut en général la sommation des

RISQUES INHERENTS AUX DIFFERENTES SOURCES D'ENERGIE

actions de deux particules). Or la probabilité pour que deux particules passent à travers le même volume est proportionnelle au carré de la dose (βD^2).

Sur le plan statistique, pour la plupart des cancers humains, la relation linéaire paraît peu vraisemblable et semble surestimer l'effet des faibles doses. Cependant, quelques données humaines, notamment celles concernant les cancers de la thyroïde et du sein, sont compatibles à la fois avec une relation quadratique ou linéaire; elles ne permettent donc pas d'exclure l'un ou l'autre de ces types de courbes dose-effet.

Quelles informations peut-on espérer obtenir des recherches expérimentales qui puissent guider dans ce choix de la relation dose-effet?

Il est généralement admis que l'induction d'une tumeur est le résultat d'une succession d'événements distincts. L'étude des cancers provoqués par des produits chimiques montre qu'on doit distinguer au moins deux étapes indépendantes: l'initiation et la promotion. L'initiation est un processus irréversible rapide par lequel une cellule normale acquiert des caractéristiques néoplasiques. La promotion est le phénomène d'après lequel une cellule transformée donne naissance à une tumeur capable de croître et d'envahir les tissus voisins. Les promoteurs sont généralement des agents stimulant la prolifération cellulaire. Il est vraisemblable que l'initiation s'apparente à une lésion du matériel génétique et plusieurs données suggèrent que pour cette transformation la relation, pour les rayons X ou gamma, serait, avec de faibles doses, surestimée par une relation linéaire. Cependant, on ne peut pas assimiler "transformation" et "cancérogénèse", notamment parce que la cellule "initiée", ou "transformée" peut rester indéfiniment à l'état "quiescent" sans proliférer.

La difficulté du passage de l'initiation cellulaire au cancer proprement dit est soulignée par les différences importantes d'induction du cancer selon les tissus, après une irradiation totale pendant laquelle toutes les cellules ont reçu les mêmes doses. C'est ainsi que la fréquence des cancers est relativement élevée dans la thyroïde ou le sein, très faible et pratiquement nulle dans la prostate ou le testicule, sans qu'il soit possible de comprendre la cause de ces différences. Au niveau d'un même tissu d'ailleurs, des différences très importantes sont observées en fonction de l'âge; par exemple, au niveau du sein chez la femme, la susceptibilité à la radiocarcinogénèse est relativement élevée entre 15 et 20 ans et très faible avant la puberté et chez la femme adulte ou âgée.

L'apparition des tumeurs après irradiation a été beaucoup étudiée chez les animaux. Pour les tumeurs consécutives à une exposition à des rayons X, l'effet par unité de dose absorbée décroît avec le débit de dose; il n'en est pas de même lorsque l'irradiation est due à des particules lourdes. Pour la plupart des tumeurs observées chez les animaux (leucémies, tumeurs des reins, de la peau et du poumon), les données sur la cancérogénèse provoquée par de faibles doses de rayons X peuvent être représentées par une relation polynomiale du second degré, ou par une courbe dose-effet linéaire avec seuil ou quasi-seuil, alors que les cancers induits par les particules lourdes correspondent plutôt à une relation linéaire entre la dose et l'effet. Il existe même plusieurs exemples d'une diminution de l'incidence des tumeurs aux faibles doses alors que l'on a obtenu dans un seul cas (néoplasie mammaire chez le rat Sprague-Dawley) une courbe linéaire sans seuil après exposition aux rayons X. Ces différences sur le type de forme mathématique des relations dose-effet ne sont pas surprenantes étant donné la diversité et la complexité des processus cancérogènes.

En radioprotection, on s'intéresse à l'effet de faibles doses délivrées sur de longues périodes. Il faudrait donc non seulement estimer l'effet de faibles doses à partir de celui observé pour des doses élevées, mais aussi tenir compte de ce que le débit de dose est

RISQUES INHERENTS AUX DIFFERENTES SOURCES D'ENERGIE

beaucoup plus faible. Or, toutes les données expérimentales suggèrent que quand une même dose de rayonnements est étalée dans le temps son effet est plus faible. Par exemple, l'effet mutagène des radiations est 3 fois plus petit à faible débit qu'à débit élevé. Ceci est d'ailleurs vrai pour la plupart des agents toxiques (l'effet d'un litre d'alcool n'est pas le même s'il est bu en une heure ou en un mois). Néanmoins, ce facteur est volontairement négligé et, pour les besoins de la radioprotection, on assimile les risques des faibles débits à ceux des débits élevés.

En résumé, bien que les informations soient très nombreuses et fournissent une évaluation satisfaisante du risque provoqué chez l'homme par de fortes doses et des débits de dose élevés, elles ne permettent pas de parvenir à une certitude sur la forme de la relation dose-effet en ce qui concerne la cancérogénèse chez l'homme, ni sur l'effet provoqué par de faibles doses de rayons X. Les analyses théoriques ainsi que les données obtenues avec des systèmes simples ou chez l'animal suggèrent que pour les rayons X ou gamma une relation du type linéaire surestime l'effet des faibles doses et tout concorde pour amener à penser que, pour des doses de l'ordre de quelques rads, le risque réel est probablement 4 à 10 fois inférieur au risque prévu par l'extrapolation linéaire. Il est sans doute plus faible encore pour des doses moindres et les faibles débits.

Cependant, lorsqu'il s'agit d'évaluer un effet nocif, il est préférable de surestimer plutôt que de sous-estimer le risque. Aussi il est vraisemblable que, pendant quelque temps encore, on continuera à estimer celui-ci au moyen d'une relation linéaire sans seuil.

EVALUATION DU RISQUE GENETIQUE

Il faut rappeler qu'il existe dans l'environnement humain de nombreux agents mutagènes qui sont capables, lorsque les mutations atteignent les cellules de l'ovaire ou du testicule, de déterminer des troubles génétiques. Les rayonnements sont les plus anciennement et les mieux connus de ces agents mais ils ne sont pas les seuls; en particulier, de nombreuses molécules produites lors de la combustion de la houille, du pétrole, du tabac, sont mutagènes. Les données les plus récentes amènent à penser que le risque génétique des rayonnements chez l'homme est moins grand qu'on ne l'avait pensé. Le fait le plus important est que les études d'Hiroshima et de Nagasaki n'ont montré aucun effet génétique anormal: les données recueillies sur la fréquence des tares congénitales, la morphologie et la survie, n'ont fait apparaître aucun effet décelable chez les descendants des survivants d'Hiroshima et de Nagasaki par rapport aux enfants de parents non irradiés. Dans des recherches animales, plus de cent générations de souris ont été exposées à raison de 200 rads par génération sans que l'on ait pu détecter de répercussion sur la viabilité ou la fécondité de leurs descendants. Les résultats de ces irradiations intensives sont donc rassurants.

Cependant, ceci ne signifie pas que les radiations n'ont pas d'effet génétique. L'absence d'effet délétère au niveau de l'individu suggère plutôt que des mécanismes de sauvegarde éliminent la plupart des embryons porteurs de tares génétiques sérieuses dès le début de la grossesse. Néanmoins, dans les évaluations de risques génétiques, ce mécanisme n'est pas pris en compte et l'on se base sur les nombreuses recherches qui ont mesuré la fréquence, par unité de dose, des divers types de mutations génétiques provoquées sur la souris et sur des insectes, en particulier la mouche du vinaigre, ou drosophile. La comparaison avec les études récentes effectuées sur des cultures de cellules humaines suggère d'ailleurs que la relation dose-effet au niveau cellulaire a la même forme chez toutes les espèces.

RISQUES INHERENTS AUX DIFFERENTES SOURCES D'ENERGIE

L'UNSCEAR, la CIPR et le BEIR ont récemment analysé chacun de son côté l'énorme masse d'informations sur les effets génétiques existant à ce jour. Leurs conclusions, quoique n'étant pas identiques, se recourent.

Les études de l'UNSCEAR et du BEIR estiment le nombre de lésions induites à un peu moins de 200 dans la descendance d'un million de sujets ayant reçu un rem, dont peut-être le quart ou la moitié s'exprimeraient à la première génération et le reste dans les 10 à 15 générations suivantes. Les conclusions de l'analyse critique de la CIPR aboutissent à une approximation voisine pour l'ensemble des générations. Lorsque l'on considère les dangers auxquels est exposé un individu, on peut penser que le dommage génétique qui l'affectera le plus est le risque d'apparition d'anomalies chez ses enfants, petits enfants et arrière-petits enfants. Ce risque serait en moyenne de 30 à 40 tares génétiques par million d'enfants après une exposition des parents à 1 rem, soit environ un tiers du chiffre obtenu par le risque somatique de cancer. Pour situer ce risque, il faut là encore le comparer à la fréquence dite naturelle qui est de 107 000 par million.

Par ailleurs, en estimant le danger par homme-rem réparti sur une population active de 20 à 65 ans, ou sur la population en général, on doit se rappeler que les deux tiers des homme-rem n'auront pas d'effet génétique nuisible car ils atteindront des individus qui n'auront de toute façon plus d'enfant. Il convient de noter que, de même, nous surestimons le risque de cancer chez les travailleurs, car on utilise les taux d'induction moyens tout en sachant que ces taux sont plus forts chez les enfants et les adolescents.

RISQUES POUR LE PUBLIC ET LES TRAVAILLEURS

Ainsi le risque total maximal, incluant à la fois le risque cancérigène et le risque génétique pour les descendants, est de $1,3 \times 10^{-4}$ par rem. Il est donc facile d'évaluer la limite maximale du risque si l'on connaît les doses reçues par le public grâce aux estimations de l'UNSCEAR et par les travailleurs grâce aux mesures directes (tableau 2). Remarquons tout d'abord que ce risque est relativement faible même quand les doses sont très élevées, proches des doses mortelles. L'excès du nombre de cancers est relativement petit par rapport à celui entraîné par d'autres activités humaines; il est par exemple, dans le groupe de survivants des bombes atomiques ayant reçu les doses les plus fortes, équivalent à celui observé chez les femmes de Californie traitées par œstrogènes pour troubles de la ménopause, ou encore, pour prendre un autre exemple, le nombre de morts par cancer provoqué par les radiations chez les survivants d'Hiroshima ou de Nagasaki est au moins 20 fois inférieur au nombre de morts par cancer provoqué dans cette population par l'usage du tabac. C'est d'ailleurs la petitesse de cet effet qui explique les difficultés d'une évaluation précise.

Pour une dose de 2 mrem/an pour la population en l'an 2000, ceci signifierait que, dans une population équivalente à celle de la France (50 millions d'habitants), l'utilisation de l'énergie nucléaire pour la production d'électricité induirait environ 2 à 10 morts par cancer par an. Ce chiffre peut paraître important, mais il faut souligner d'une part qu'il est estimé à partir d'une hypothèse volontairement pessimiste et que le chiffre réel peut être inférieur voire nul, d'autre part que ce risque est petit comparé au nombre de morts par cancer (environ 120 000 par an en France, voir tableau 3) et que la cigarette à elle seule cause en France 20 000 morts par cancer par an. Le tableau donne quelques indications sur les principales causes de mortalité en France et ceci permet de comparer le risque des rayonnements à d'autres risques.

RISQUES INHERENTS AUX DIFFERENTES SOURCES D'ENERGIE

Tableau 3. Principales causes de morts en France

Causes	Nombre de morts par an (France)	Risque annuel taux/10 ⁶ personnes
Mortalité totale	≅ 600 000	11 500
Accidents de circulation	≅ 15 000	285
Accidents domestiques	≅ 5 000	≅ 100
Accidents de vacanciers	≅ 3 600	180
Accidents du travail et maladies professionnelles	≅ 2 300	160
Incendies	≅ 2 100	40
Foudre	≅ 25	0,5
Electrocution	≅ 200	≅ 4
Cancers totaux	≅ 120 000	2 300
Leucémie	≅ 4 000	77
Tabagisme	≅ 70 000	1 300
Alcoolisme	≅ 40 000	750

On peut d'ailleurs évaluer le risque d'autres éléments de la vie quotidienne de façon analogue. Considérons par exemple l'effet cancérogène du tabac. Les données statistiques établies sur plusieurs millions de sujets montrent qu'à partir de 3 cigarettes fumées par jour (soit environ 1000 cigarettes/an), il y a déjà une augmentation significative du risque de cancer du poumon; pour 10 cigarettes par jour, celui-ci est multiplié par environ 8, et pour 20 cigarettes par jour par environ 20. En prenant l'hypothèse d'une relation linéaire entre le nombre de cigarettes fumées et l'effet, on peut évaluer par une règle de trois le risque induit par 1 cigarette par jour, ou par an, ou pendant toute une vie. On peut de la même façon évaluer le risque de cirrhose alcoolique ou de cancer de l'oesophage provoqués par 1 gramme d'alcool, le risque d'accident mortel de la circulation par kilomètre parcouru, etc.

Comparons maintenant ces risques à ceux causés par une irradiation (tableau 4). On voit ainsi que le risque provoqué par une cigarette est équivalent à celui causé par la dose de rayonnement reçue pendant une demi-journée d'irradiation à dose maximale admissible pour les travailleurs ou pour 3 années de séjour à proximité d'une centrale nucléaire.

Dans le cas des travailleurs, il faut, pour apprécier objectivement le risque, le situer par rapport aux autres risques professionnels.

Le tableau 5, d'après Reissland, indique l'ordre de grandeur du raccourcissement moyen de la durée de vie que l'on peut escompter être provoqué, dans les hypothèses pessimistes,

RISQUES INHERENTS AUX DIFFERENTES SOURCES D'ENERGIE

Tableau 4. Risques comparatifs

Un risque de mort de 1 sur 1 million correspond à :

- 650 km en avion
 - 100 km en voiture
 - 3/4 d'une cigarette
 - 1,5 minute d'alpinisme
 - 20 minutes de vie à 60 ans
 - absorption de pilules contraceptives pendant 2,5 semaines
 - 1/2 bouteille de vin
 - exposition à 10 mrem
- } exposition à la dose maximale admissible
(professionnelle) d'une demi-journée

ou

} séjour pendant trois ans au voisinage
d'une centrale nucléaire

En partie d'après Pochin.

Tableau 5. Durée moyenne du raccourcissement de la vie (en jours)
(New Scientist 13.9.79)

	Pour 1 an de vie professionnelle (sujet de 40 ans)	Pour 35 ans de vie professionnelle
Pêche en haute mer	31,9	923
Mine de charbon	3,6	103
Raffinerie de pétrole	2,6	74
Chemin de fer	2,2	63
Bâtiment	2,1	62
Industrie (valeur moyenne)	0,5	13,5
Irradiation professionnelle à 5 rems/an	1,3	32
Irradiation professionnelle à 0,5 rem/an	0,1	3

d'après Reissland.

RISQUES INHERENTS AUX DIFFERENTES SOURCES D'ENERGIE

par une irradiation à la dose maximale admissible. Il est comparable à celui observé dans les activités professionnelles courantes. De plus, la dose moyenne reçue par les travailleurs exposés est, l'expérience le montre, en moyenne dix fois inférieure à la dose admissible. L'industrie nucléaire se classe donc parmi les activités professionnelles comportant des risques modérés.

Enfin, de nombreux travaux, qui sont examinés par ailleurs et ont été présentés à plusieurs réunions scientifiques, ont tenté de comparer les risques entraînés pour la population et les travailleurs des différents modes de production d'énergie. On doit, pour comparer ces risques, les ramener à la production d'un mégawatt/an pour chacun des systèmes énergétiques. Il faut cependant remarquer qu'un handicap important frappe l'électronucléaire dans ces comparaisons. En effet, dans le cas des autres systèmes, on dispose de données statistiques sur les incidences sanitaires alors que, dans le cas du nucléaire aucun incident sanitaire n'ayant été constaté, on évalue le risque à partir de considérations théoriques qui conduisent comme on l'a vu, par prudence, à majorer le risque. De plus, dans le cas du nucléaire, on introduit dans l'estimation des risques le risque génétique pour la descendance, ce qui ne se pratique jamais en hygiène classique et dans l'estimation des risques des autres systèmes.

On objectera que les risques du nucléaire peuvent être minimes en fonctionnement normal mais qu'ils peuvent être fortement majorés en cas d'accident. On peut répondre à cela tout d'abord que l'expérience déjà acquise (plusieurs milliers d'années-réacteurs) montre que les accidents sont rares et que de plus ils sont statistiquement prévisibles (voir notamment rapport Rasmussen). Aussi, la plupart des rapports incluent dans l'estimation des risques sanitaires ceux dus aux contaminations par rejets accidentels (type Windscale ou Three Mile Island) et même les possibilités de catastrophe nucléaire. Même en en tenant compte, le risque sanitaire de l'électronucléaire demeure faible par rapport à ceux des autres modes de production d'énergie, d'autant que les accidents ne sont pas l'apanage du nucléaire et s'observent avec tous les systèmes énergétiques. Il suffit de rappeler à cet égard les ruptures de barrages hydrauliques, les accidents de transport du pétrole ou du méthane, les incendies dans les raffineries, les accidents dans les mines de charbon, etc.

Au total, grâce à l'extraordinaire sensibilité et précision des méthodes de mesure, grâce aux recherches effectuées depuis la fin du XIXe siècle, les risques dus aux rayonnements ionisants sont certainement parmi les mieux connus. Ils apparaissent relativement très faibles autour des installations nucléaires qui ont bénéficié des mesures de radioprotection mises au point par les radiologistes pour se protéger eux-mêmes et pour protéger les malades. Les conséquences sanitaires d'accidents peuvent être estimées, elles paraissent faibles grâce aux mesures de sécurité élaborées qui sont prises et elles sont inférieures, ou comparables, à celles d'accidents survenus dans des installations industrielles ou hydrauliques classiques. Paradoxalement c'est la prudence, le caractère très sophistiqué des précautions prises, qui éveillent l'inquiétude, ainsi peut-être que les résonances très particulières qu'éveille dans le public et même chez certains scientifiques le mot "atome".

Références

CROW, J.F., "Can we assess genetic risks? "

Proceedings of the Sixth Congress of Radiation Research (Ed. Tokada et al.) p. 70-78 - Tokyo 1979.

RISQUES INHERENTS AUX DIFFERENTES SOURCES D'ENERGIE

FINCH, C.S., "Hiroshima and Nagasaki. A review of 30 years of study.

Proceedings of the Sixth Congress of Radiation Research (ed. Tokada et al.) p. 50-58 - Tokyo 1979.

Rapport 26 de la CIPR. Recommandations de la Commission internationale de protection radiologique. Annales de la CIPR, Vol. 1, No. 3, Pergamon Press, Oxford (New York City, 1977).

Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants. United Nations publication sale No. E.77.IX., Vol.1 (New York, 1977) 1-725.

Colloque sur les risques comparés des différents modes de production d'énergie (Paris, janvier 1980).