

# L'ère nucléaire: analyse des risques et problèmes de radioprotection

par K.G. Vohra

Si nous voulons pouvoir continuer à utiliser l'énergie de l' "ère nucléaire", il nous faut poser correctement le problème de la protection radiologique. Nous avons déjà derrière nous un demi-siècle d'études sur la radioprotection, et nous connaissons aujourd'hui les risques des rayonnements ionisants beaucoup mieux que ceux des substances chimiques toxiques issues des centrales chauffées aux combustibles fossiles, des usines chimiques ou des automobiles. On trouvera ici une étude comparative des risques auxquels ces deux catégories de sources exposent notre santé. Il s'agit avant tout, dans l'une comme dans l'autre, de la mortalité par cancer et des effets génétiques. Le nombre et la diversité des éléments carcinogènes et mutagènes présents dans l'environnement humain exposent l'homme à beaucoup plus d'effets nocifs que les rayonnements. Nous examinons ici les risques de mortalité par cancer chez les individus et les populations exposés. Notre analyse comparative des risques provenant des deux sources montre qu'il faut de toute urgence réduire au minimum ceux qui sont d'origine chimique, notamment les carcinogènes émis par les sources d'énergie non-nucléaires.

**Tableau I. Estimations du risque absolu de leucémie et de tous autres cancers<sup>a</sup> par groupes d'âge (Les estimations portent sur toute la durée de la vie qui suit la période latente)**

Classe d'âge	Type de cancer	Risque absolu
0 à 9 ans	leucémie	2,0
0 à 9 ans	tous autres cancers	1,0
plus de 10 ans	leucémie	1,0
plus de 10 ans	cancer du sein	1,5
plus de 10 ans	cancer du poumon	1,3
plus de 10 ans	tube digestif, estomac compris	1,0
plus de 10 ans	os	0,2
plus de 10 ans	tous autres cancers	1,0
Total pour la classe de 0 à 9 ans		3
Total pour la classe au dessus de 10 ans		6

<sup>a</sup> Décès par million, par an et par rem.

M. K.G. Vohra appartient au Centre de recherches atomiques de Bhabha, Département de l'énergie atomique, Bombay (Inde).

## ANALYSE DES RISQUES DUS AUX RAYONNEMENTS IONISANTS

Il est établi que les rayonnements ionisants provoquent le cancer chez l'homme, et c'est sur ce point que portent généralement toutes les analyses de risques. C'est le plus souvent en nombre annuel de décès ou de cas de cancer dans une population d'un million d'individus exposés à une dose de 1 rad ou rem que l'on exprime le risque absolu d'un type donné de cancer. Pour chiffrer le risque qu'entraînent des doses plus faibles, on procède généralement par extrapolation des données recueillies pour des individus exposés à des doses et débits de dose élevés. Cette catégorie d'individus comprend les survivants des bombes A de Hiroshima et de Nagasaki, certains groupes de malades ayant subi des irradiations thérapeutiques, et les gens soumis à une exposition professionnelle. Le tableau I donne les estimations des risques absolus pour divers types de cancer établies d'après la fréquence des décès dans les groupes ci-dessus par la Commission consultative des Etats-Unis sur les effets biologiques des rayonnements ionisants (Commission BEIR) [1]. La figure 1

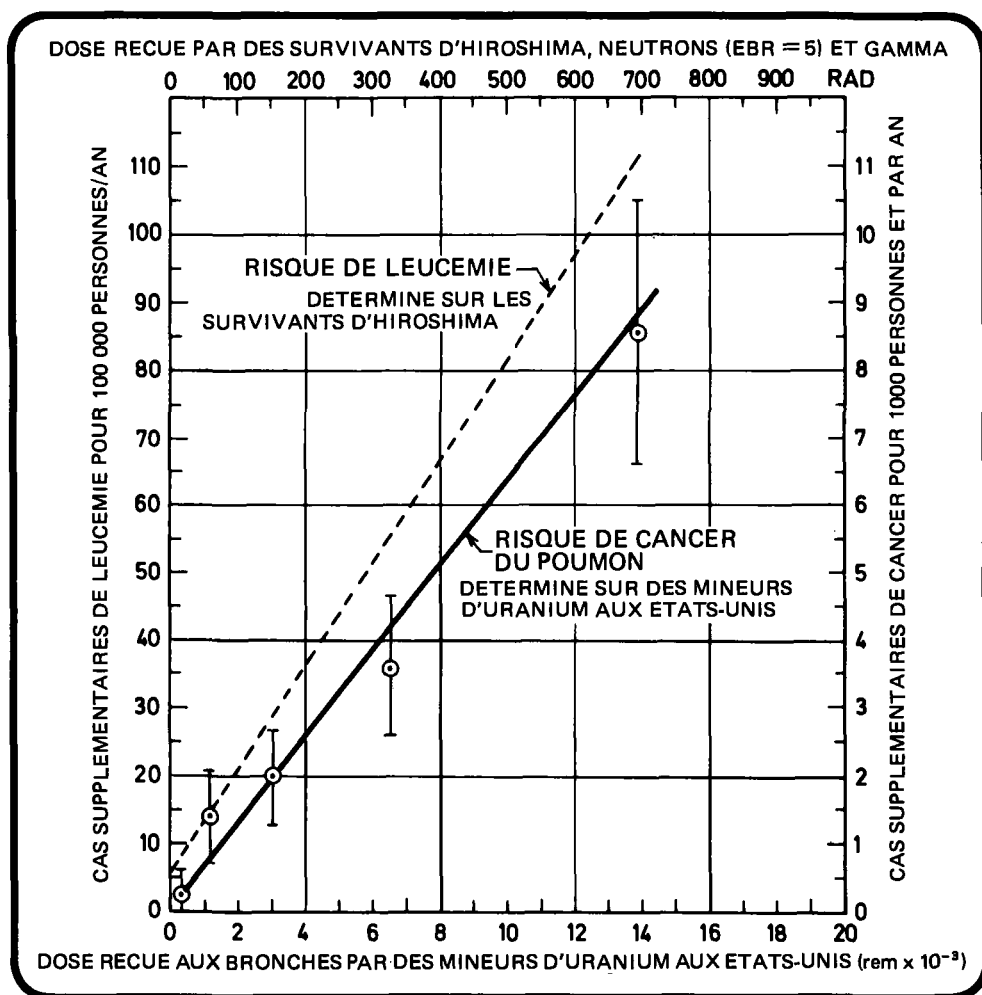


Figure 1. Rapports caractéristiques entre dose et réactions chez les survivants de Hiroshima (1950–1966) et les mineurs d'uranium des Etats-Unis (1951–1971), extraits de la Réf. 1.

illustre les réactions humaines aux doses qui ont servi à établir les estimations du tableau I (leucémie et cancer du poumon). Ces estimations tiennent également compte de l'efficacité biologique relative (RBE) du rayonnement. Lorsqu'on extrapole à partir des doses élevées pour déterminer les doses plus faibles, on suppose que la fréquence de la malignité est directement proportionnelle à la dose, et qu'il n'existe pas de seuil à partir duquel la dose ne provoque pas de cancer. Bien que cette dernière hypothèse paraisse scientifiquement solide, la relation n'est peut-être pas linéaire pour tous les genres d'exposition. On peut, à partir des estimations de risques portant sur les expositions isolées du tableau I, calculer le nombre annuel de décès dus à une exposition ininterrompue de 1 rem/an pendant toute l'existence. On a fait le calcul à partir des données figurant au rapport de la commission BEIR [1] et obtenu une estimation de 150 décès/million par rem/an, la limite supérieure étant probablement de 200 décès/million par rem/an. Cette dernière valeur permet de calculer le risque de décès par cancer dus à une exposition ininterrompue de groupes d'individus qui reçoivent des doses provenant des effluents gazeux et liquides issus de centrales nucléaires, et d'évaluer les risques aux différents stades du cycle du combustible. Cette valeur sert aussi à évaluer les risques de l'exposition professionnelle dans l'industrie nucléaire et ceux de l'exposition médicale.

Examinons maintenant les doses que reçoit effectivement la population exposée à partir de diverses sources et notamment du fait de l'exploitation des centrales nucléaires, et évaluons le risque. La dose la plus forte reçue par l'homme provient toujours de sources naturelles: rayons cosmiques, rayonnement gamma terrestre,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  et  $^{210}\text{Po}$  dans les tissus et les os de l'homme, produits de filiation du radon déposés dans les voies respiratoires par aspiration, et autres substances radioactives naturelles du corps humain. Les doses moyennes dues à ces diverses sources totalisent près de 100 mrem/an soit 3 rem en 30 ans. Cette dose est fournie sans interruption, avec un débit extrêmement faible. Elle consiste en expositions à des rayonnements à transfert linéique d'énergie élevée et faible, et intéresse la plupart des régions où l'homme est sujet au cancer.

Alors que les sources naturelles irradient la totalité de la population du globe, la dose due à l'exploitation des centrales nucléaires, dont il est fait état pour l'évaluation des risques, n'atteint que quelques groupes d'individus exposés aux effluents liquides et gazeux de ces centrales, ainsi que les personnes soumises à une exposition professionnelle. La dose à la population en provenance de ces sources varie selon le type et les conditions d'exploitation du réacteur; elle est généralement très inférieure aux limites prescrites par la Commission internationale de protection radiologique. On évalue à moins de 5 mrem/an la dose moyenne reçue par des groupes d'individus exposés aux effluents d'une centrale nucléaire, lorsqu'il s'agit d'une installation tout à fait au point exploitée dans les règles de l'art. L'exemple de plusieurs centrales importantes a largement confirmé cette évaluation [2, 3]. Cette dose ne représente qu'environ 5% de la dose naturelle qui est de 100 mrem/an, et elle comprend les expositions tant internes qu'externes. Le risque correspond à un seul décès annuel par cancer de plus sur le million de personnes exposées, même dans l'hypothèse de l'évaluation la plus élevée du nombre des cas, à savoir 200 décès par cancer/million par rem/an. Le cas supplémentaire unique n'a guère d'importance statistique car, dans une grande partie du monde, mille à deux mille personnes par million meurent chaque année de cancers spontanés.

Par contre il faut prendre très au sérieux les expositions résultant d'actes médicaux, entre autres les radioscopies de diagnostic et les traitements aux rayons X. La dose somatique annuelle due aux diagnostics par radioscopie est de l'ordre de 20 à 100 mrem, selon la nature et la fréquence des examens et les précautions prises. Si l'on admet que la dose moyenne annuelle aux groupes de patients soumis à l'exposition d'origine médicale est de l'ordre de 50 mrem, leur risque de cancer sera de 10/million par an, ce qui est peu. Entre

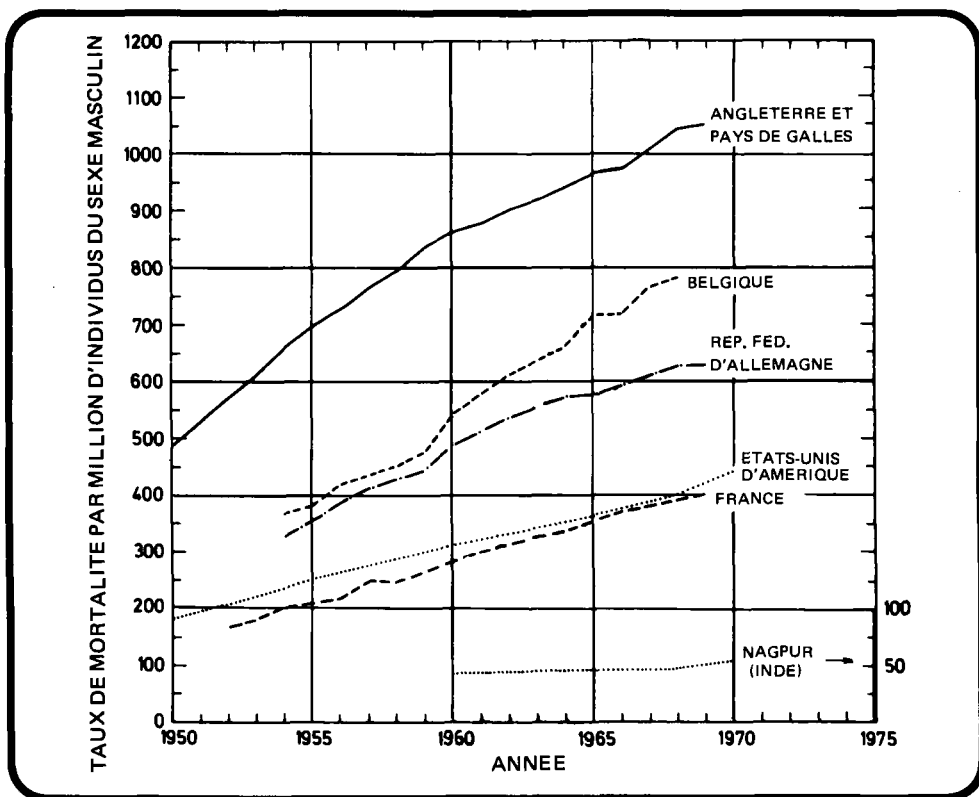


Figure 2. Accroissement du taux de mortalité par cancer du poumon chez les individus du sexe masculin dans quelques pays d'Europe occidentale, aux Etats-Unis et à Nagpur (Inde).

autres sources diverses d'exposition aux rayonnements il faut citer les retombées, les postes de télévision, les appareils industriels et domestiques, les voyages aériens, etc. Leur action est également très faible en comparaison de l'exposition naturelle.

#### ANALYSE DES RISQUES PRESENTES PAR LES POLLUANTS CHIMIQUES TOXIQUES

On sait que plusieurs polluants chimiques provoquent des cancers de divers types mais, contrairement à ce qui se passe pour les rayonnements ionisants, on n'a pas recueilli systématiquement les données qui permettraient de faire une analyse chiffrée des risques. Les polluants chimiques provoquent non seulement des cancers, mais aussi des décès par maladies cardiaques, emphysème, bronchite chronique et autres affections. Une analyse générale des risques devrait comprendre les décès dus à toutes ces causes. On a constaté depuis vingt ans une rapide augmentation du nombre des décès par cancer et maladies cardiaques, dont les polluants chimiques sont probablement en grande partie responsables. On évalue à près de 50% la proportion des cas de décès dus au cancer et aux maladies cardiaques. [4].

On a identifié quelques-uns des polluants de l'environnement qui peuvent provoquer le cancer, entre autres les substances minérales telles que l'amiante, l'arsenic, le chrome, le nickel, et les matières organiques telles que le benzopyrène, la benzidine, le chlorure de vinyle et le goudron de houille. La combustion du charbon produit des quantités notables de benzopyrène, et l'on en constate également la présence dans les gaz d'échappement des

automobiles. Une analyse des risques reposant sur de vastes études épidémiologiques renseigne très utilement sur le danger que ces polluants font courir à de nombreuses populations. C'est ainsi qu'on a pu faire appel aux données récemment recueillies sur l'augmentation des cas de cancer du poumon attribués à la pollution de l'air. La figure 2 donne le nombre des cas de décès par cancer du poumon dans quelques pays d'Europe occidentale [5], aux Etats-Unis [6] et en Inde [7, 8]. Elle montre que le nombre des cas de cancer n'a cessé d'augmenter de 1950 à 1970. L'accroissement continu de la production d'énergie au moyen du charbon et du pétrole y est peut-être pour quelque chose, encore que d'autres facteurs aient également pu intervenir.

Il est bien établi que la pollution de l'air, tout comme l'usage de la cigarette, provoque le cancer. Pour déterminer la part de la pollution de l'air, on a fait appel à la méthode de l'analyse de régression, en partant des statistiques de mortalité par cancer du poumon et des renseignements qu'on possède sur la pollution par la fumée et la consommation des cigarettes [9] afin de déterminer la relation entre l'augmentation des cas de cancer et la pollution résultant de la combustion du charbon dans les centrales thermiques. Cette analyse a permis de constater une augmentation annuelle de près de 152 cas de décès par cancer du poumon par million, par tonne de charbon consommée et par personne, dans une population où, pour un million de décès dus à toutes les causes, il y en a 750 qui résultent de cancer du poumon chez des individus de tous âges et des deux sexes (Angleterre et Pays de Galles 1958-1959). Encore que le modèle qui a servi à l'analyse ait ses limites, les évaluations indiquent que le risque de cancer du poumon dû aux centrales chauffées au charbon est plusieurs fois supérieur à celui qu'entraînent les centrales nucléaires. L'analyse de régression a également révélé une augmentation de 15% du taux moyen de mortalité par cancer du poumon due à la consommation de cigarettes (pour  $10^3$  cigarettes par an). Le risque général de décès dus à des causes autres que le cancer du poumon qu'entraînent les polluants provenant des centrales chauffées au charbon est probablement encore plus élevé. On a fait une étude similaire de la mortalité par cancer du poumon due à l'inhalation du carcinogène spécifique qu'est le benzopyrène dégagé par la combustion du charbon, à partir de nombreux renseignements recueillis dans 48 des Etats américains sur la concentration de ce carcinogène et la fréquence des cancers du poumon [9]. On a constaté une augmentation de près de 48 cas de décès dus au cancer du poumon par million, par  $\text{ng}/\text{m}^3$  de benzopyrène, dans une population où, sur un million de décès, il y en a 867 qui sont provoqués par le cancer du poumon. On voit donc qu'un seul carcinogène chimique présente un risque supérieur d'un ordre de grandeur à celui que présentent les effluents des centrales nucléaires.

Prenons maintenant l'augmentation du nombre total des décès par cancer du poumon depuis vingt ans (figure 2), et admettons que 85% de cette augmentation sont dus à la pollution de l'air, le tabac étant responsable des 15% restants: nous pourrions alors calculer le risque total de cancer du poumon qu'entraîne la pollution de l'air. La figure 2 montre que le nombre des cas par million en Angleterre et au Pays de Galles a augmenté de près de 500 dont 425 peuvent être attribués à la pollution de l'air, dans une population où, en 1970, sur un million de décès, il y en a eu au total 1050 dus au cancer du poumon.

Le tableau II expose tous les résultats ci-dessus et récapitule le nombre de décès par cancer par million dus à l'exposition à divers polluants, dont les effluents des centrales nucléaires et des centrales thermiques, au benzopyrène et à la pollution générale de l'air. Le pourcentage des décès par cancer est de 0,06 pour les centrales nucléaires, de 19% pour les effluents des centrales chauffées au charbon et de 41,9 pour la pollution générale de l'air. Pour le benzopyrène, carcinogène spécifique émis par la combustion du charbon, l'effet, c'est-à-dire l'augmentation du nombre de cas de cancer du poumon, est de 5,5% par  $\text{ng}/\text{m}^3$ . Cette comparaison, encore qu'elle repose sur des données provenant de pays différents, est assez frappante pour donner une idée générale du problème.

**Tableau II. Récapitulation de l'estimation des décès par cancer et par million dus aux effluents des centrales nucléaires et aux centrales chauffées au charbon: Benzopyrène et pollution générale de l'air**

Nature de l'exposition	Type de risque	Total des décès par million dus au risque de la colonne 2	Part de l'exposition envisagée à la colonne 1	Pourcentage du total des décès dus à l'exposition
1	2	3	4	5
Dose de 5 mrem provenant d'effluents nucléaires	Cancer, y compris la leucémie	1500 <sup>a</sup>	1	0,06
Benzopyrène dans l'air des villes	Cancer du poumon (Accroissement par ng/m <sup>3</sup> )	867 <sup>b</sup>	48	5,5
Effluents des centrales chauffées au charbon	Cancer du poumon (accroissement par tonne de charbon par personne)	750 <sup>b</sup>	142	19,0
Pollution générale de l'air	Cancer du poumon	1050 <sup>b</sup>	425	41,9

<sup>a</sup> Estimation du nombre moyen annuel de décès par cancer par million.

<sup>b</sup> Estimation du nombre annuel de décès par cancer du poumon par million dans la population envisagée (voir le texte).

## COMPARAISON DES RISQUES DU NUCLEAIRE ET DU CHARBON

Ce que nous savons sur l'exposition aux rayonnements et sur l'absorption de benzopyrène nous permet maintenant de placer sous son vrai jour la comparaison entre les risques de l'énergie nucléaire et ceux que présentent les centrales chauffées au charbon. L'une et les autres peuvent être carcinogènes, comme l'ont parfaitement établi les cas enregistrés chez l'homme et les expériences effectuées sur des animaux soumis à de fortes expositions. Comme l'homme a toujours été exposé à une assez forte dose de rayonnement naturel, il n'est guère probable que le rayonnement ionisant à faible dose puisse lui infliger quelque nouveau dommage. Toutes réserves étant faites sur ces deux estimations du risque, la comparaison chiffrée nous donne de quoi apprécier la sûreté d'un système donné. Mais cette comparaison, qui figure au tableau II, exige un complément d'explications. L'estimation des risques de l'énergie nucléaire repose sur l'hypothèse d'une centrale conçue pour fonctionner dans des conditions de sûreté optimales, en un lieu choisi pour éviter d'exposer la population à un excès d'effluents provenant de plusieurs installations. C'est ce que signifie la limitation rigoureuse à 5 mrem/an imposée à l'exposition qu'entraîne un grand programme d'énergie nucléaire. La limite recommandée en pareil cas par la Commission internationale de protection radiologique est de 500 mrem/an, soit cent fois plus. Comparons maintenant ces limites aux risques qu'entraîne l'absorption de benzopyrène.

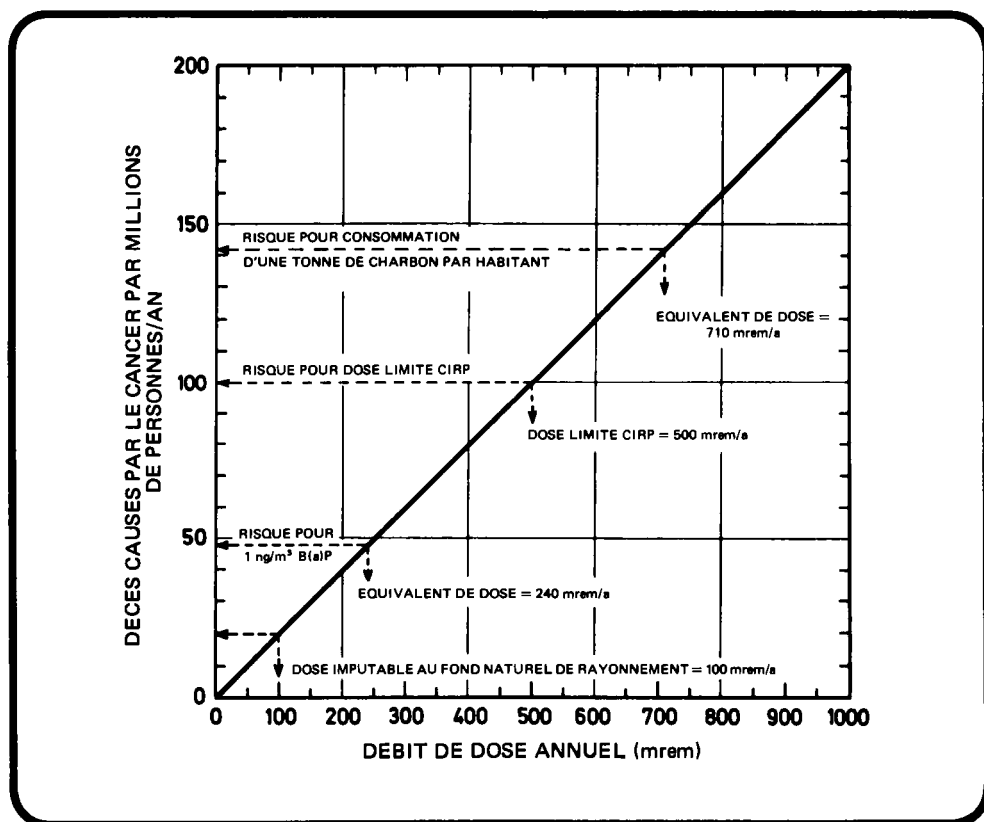


Figure 3. Risque de cancer dû à l'exposition aux rayonnements, d'après le rapport du Comité BEIR. La figure montre également les équivalents de dose pour le cancer du poumon, le risque dû aux centrales chauffées au charbon et au benzopyrène.

La figure 3 représente le risque de cancer (en décès/million par an) sous exposition continue à divers débits de dose annuels de rayonnement ionisant. Elle montre également les équivalents de dose correspondant à une consommation annuelle d'une tonne de charbon par habitant et à 1 ng/m<sup>3</sup> de benzopyrène dans l'air. L'équivalent de dose de 1 ng/m<sup>3</sup> de benzopyrène, pour le même risque, à savoir 48 décès par million (tableau II) est de 240 mrem/an, à savoir 48 pour cent de l'exposition admissible des individus à 500 mrem/an recommandée par la Commission internationale de protection radiologique. Dans diverses villes du monde (à l'exclusion des régions de forte concentration industrielle), la teneur en benzopyrène de l'air est de 1 à 4 ng/m<sup>3</sup>. On peut en conclure que le risque actuellement dû à la seule inhalation du benzopyrène est près de cent fois supérieur à celui que présenterait la dose de rayonnement issue d'un grand programme d'énergie nucléaire.

**Tableau III. Estimation du risque professionnel aux différentes étapes du cycle du combustible nucléaire (Exposition de tout l'organisme)**

Etape du cycle du combustible	Exposition individuelle moyenne (en mrem/a)	Estimation du risque (cas/10 000)	Risques de cancers spontanés (sur 10 000)
Extraction	500	1	15
Production et traitement	100	0,2	15
Exploitation du réacteur	200	0,4	15
Transport du combustible	50	0,1	15
Usines de retraitement	200	0,4	15

**Notes:**

1. Les risques sont estimés pour 10 000 personnes travaillant à chaque opération. Si l'on envisage le nombre réel des travailleurs, les risques deviennent négligeables en comparaison de ceux du cancer spontané.
2. En ce qui concerne les mineurs, l'estimation ne porte que sur la dose reçue par l'extérieur du corps entier.
3. Les estimations d'expositions individuelles sont les meilleures que l'on possède en provenance de diverses sources. Voir la référence 14 pour l'exploitation des réacteurs.

## LES RISQUES PROFESSIONNELS DANS LE CYCLE DU COMBUSTIBLE NUCLEAIRE

Pour que l'étude du risque du cycle du combustible nucléaire soit complète, il faut tenir compte des dangers inhérents à toutes les opérations qu'il comporte, y compris l'extraction, la production et le traitement de l'uranium, la fabrication du combustible, l'exploitation du réacteur et le retraitement du combustible. D'après l'estimation de la dose moyenne provenant de chaque opération, on peut évaluer le risque de cancer qu'elle entraîne, en faisant appel, là encore, au chiffre de 200 décès/million par an/rem que donne le Comité BEIR pour l'exposition continue ou répétée. Les chiffres figurent au tableau III, où le risque est estimé en nombre de cas par 10 000 travailleurs. La dernière colonne indique le risque de cancer spontané. Chez les mineurs d'uranium, le risque n'est actuellement que de un sur 10 000 alors qu'une enquête effectuée sur la période 1950—1967 avait indiqué une mortalité excédentaire de 15 sur 10 000 [10]. A tous les stades du cycle du combustible le risque est inférieur à l'unité. L'analyse des risques dans le cycle du combustible des surgénérateurs à métal liquide peut reposer sur l'émission de <sup>239</sup>Pu et d'autres éléments transuraniens lors du retraitement du combustible destiné à ces réacteurs. La dose à la population émise par une usine de retraitement desservant un surgénérateur à métal liquide de 1000 MW(e) ne représente que 10<sup>-8</sup> de la dose alpha naturelle, ce qui, à l'échelle envisagée, donne un risque extrêmement faible. [11]



En comparaison, une seule centrale de 1000 MW(e) chauffée au charbon donne lieu à près de deux cas mortels par an, en comptant l'extraction, le traitement et le transport [12]. L'exposition industrielle à certains produits chimiques peut entraîner de 10 à 30 décès par cancer par 10 000 travailleurs chaque année [13]. L'emploi dans l'industrie du chlorure de vinyle, de la benzidine et de plusieurs autres produits chimiques a multiplié les cas de cancer, et c'est pourquoi l'on prend actuellement des mesures pour enrayer ces risques professionnels. On peut dire que si les industries chimiques et autres veulent réduire les risques qu'elles font courir à leur personnel et à la population, elles ont beaucoup à apprendre de l'industrie nucléaire.

## RESUME ET CONCLUSIONS

Pour évaluer les risques de mort par cancer dus à différentes doses on a fait appel à une analyse quantitative des risques reposant sur l'expérience acquise de l'exposition de l'homme aux rayonnements ionisants. Le risque correspondant à une dose évaluée à 5 mrem que courent des groupes d'individus exposés aux émissions des centrales nucléaires est de *un* par million et par an. Il est donc statistiquement insignifiant par comparaison avec les taux de mortalité par cancer spontané, qui sont de 1000 à 2000 par million et par an. Les expositions dues au diagnostic médical donnent des doses et des risques dix fois plus élevés. On a également fait l'analyse des risques en ce qui concerne les polluants chimiques, notamment les produits de la combustion du charbon, dont le benzopyrène, carcinogène bien connu. On a constaté que le risque créé par l'inhalation du benzopyrène que contient l'air des villes est près de 100 fois supérieur à celui que provoque l'exposition aux rayonnements issus d'une grande installation d'énergie nucléaire. L'étude des risques professionnels du cycle du combustible nucléaire montre également qu'ils sont dans l'ensemble très faibles comparés à ceux que comporte la production d'énergie électrique au moyen de combustibles fossiles.

## Références

- [1] US NATIONAL RESEARCH COUNCIL, The Effects on Populations of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiations, Report of the Advisory Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations, Washington, 1972.
- [2] DAS GUPTA, A.K., TANIGUCHI, H., MEASURES, M.P., Canadian Experience in Assessing Population Exposures from Candu Reactors, Population Dose Evaluation and Standards for Man and his Environment (Proc. Sym. Portorož, 1974), AIEA, Vienne, 1974, 261.
- [3] BAYER, A., KRISHNAMURTHI, T.N., SCHUCKLER, M., Population Dose Considerations for the Release of Tritium, Noble Gases and I-131 in a Special Region, *Ibid.*, 235.
- [4] US COUNCIL ON ENVIRONMENTAL QUALITY, Environmental Quality, 6th Annual Report, Washington, 1975.
- [5] CONSEIL DE L'EUROPE, Le cancer du poumon en Europe occidentale, 2ème édition, Strasbourg, 1972.
- [6] MILLER, J.A., MILLER, E.C., Chemical and Radiation Carcinogenesis in Man and Experimental Animals, Proc. 5th Int. Congress of Radiation Research, Seattle, 1974, Academic Press, 1975, 158.
- [7] RAO, G.R., SHINDE, A.V., *Indian J. Cancer* **13**, 1976, 1.
- [8] PAYMASTER, J.C., GANGADHARAN, P., *J. Indian Med. Assoc.* **57**, 1971, 63.
- [9] CARNOW, B.W., MEIER, P., *Arch. Environ. Health* **27**, 1974, 207.
- [10] LUNDIN, F.E. Jr. et autres, *Health Phys.* **16**, 1969, 571.
- [11] BARR, N.F., Assessment of Potential Health Consequences of Transuranium Elements, Population Dose Evaluation and Standards for Man and his Environment, (Proc. Symp. Portorož, 1974), AIEA, Vienne, 1974, 451.
- [12] HAMILTON, L.D., MORRIS, S.C., Proc. 1974 Mid-year Topical Symp. Population Exposures, Knoxville 1974, Tech. Rep. CONF. 741018, 1974.
- [13] POCHIN, E.E., *Community Health* **6**, 1974, 2.
- [14] US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Estimates of Ionizing Radiation Doses in the United States, 1960-2000, Report of the Special Studies Group, Division of Criteria and Standards, Office of Radiation Programs, Rockville, Maryland, ORP/CSD 72-1, 1972.

---

Communication à la Conférence internationale sur l'énergie d'origine nucléaire et son cycle du combustible, Salzbourg, 2-13 mai 1977.