

RISQUES D'ACCIDENTS DANS LES CENTRALES NUCLEAIRES  
ET CONSEQUENCES POUR LA POPULATION ET LA BIOSPHERE

Karl Z. Morgan

School of Nuclear Engineering and Health Physics  
Georgia Institute of Technology  
Atlanta, Georgie, Etats-Unis

RESUME

Par la force des choses, toutes les estimations de probabilités d'accidents importants dans des centrales nucléaires génératrices d'énergie électrique ne sont que des conjectures, parce que nous ne disposons que de 25 années d'expérience d'exploitation de réacteurs à eau légère LWR (Light Water Reactors) et de 10 ans seulement pour les surgénérateurs (breeders). Deux tentatives ont été faites aux Etats-Unis en vue de déterminer ces probabilités : le rapport Brookhaven (1957) et le rapport Rasmussen (1975). C'est sur le rapport élaboré par le Brookhaven National Laboratory que se fonde le Price-Anderson Act, texte de loi qui est une source d'irritation aux Etats-Unis. En effet, beaucoup de gens considèrent que le rapport Brookhaven a exagéré les risques, c'est la raison pour laquelle - 18 ans plus tard - le rapport Rasmussen a été chaleureusement accueilli. Toutefois, peu avant l'accident de Three Mile Island (TMI-2) survenu après que plusieurs accidents graves aient déjà risqué de se produire dans ce réacteur, la Nuclear Regulatory Commission des Etats-Unis (USNRC) avait renoncé à appuyer le rapport Rasmussen. Il faut dire que le choix d'un surgénérateur rapide refroidi par métal liquide LMFBR (Liquid Metal Fast Breeder Reactor) n'a pas été heureux, principalement en raison de ses répercussions tant en ce qui concerne les risques de prolifération des armes nucléaires

que les dangers pour la santé de l'homme. Actuellement, aux Etats-Unis, les 73 réacteurs produisant de l'énergie électrique sont exploités de telle sorte que la probabilité d'occurrence d'un accident du type TMI-2 serait de un en 270 à 2700 ans, selon la valeur indiquée dans le rapport Rasmussen : un sur 20 000 à 200 000 , par année/réacteur. Si l'on s'en tient aux évaluations contenues dans ce rapport, la probabilité d'un accident impliquant la fusion du coeur du réacteur serait de  $5 \times 10^{-6}$  à  $5 \times 10^{-5}$  par année de réacteur. Or, cette estimation ne concorde pas avec l'expérience, correspondant aux 300 années de réacteur, accumulée au moment de l'accident TMI-2, soit  $3 \times 10^{-3}$  accidents par année de réacteur. En revanche, les évaluations contenues dans le rapport Brookhaven concernant les probabilités d'accidents et de risques sont plus proches de l'estimation brute tirée de TMI-2. L'USNRC prétend qu'il ne s'est produit qu'une très faible libération d'éléments radioactifs constitués par les radionuclides de gaz nobles et d'iode mais son estimation des risques ne commence qu'à partir de 7 heures du matin, au lieu de 4 heures, moment où l'accident s'est réellement déclenché. L'activité initiale des radionuclides de courte durée de vie des gaz nobles et de l'iode était de plusieurs ordres de grandeur supérieure à celle de Xe-133 et de I-131, sur laquelle se fondent principalement la plupart des évaluations de doses. Plusieurs sources de données suggèrent que la dose subie par la population a été supérieure aux évaluations de l'USNRC et que les premières fuites de radionuclides à courte durée de vie en sont peut-être la raison. Les estimations de l'USNRC relatives aux risques de cancer et de mutation génétique, résultant des doses de radiations indiquées, sont faibles - probablement inférieures d'un ordre de grandeur à la réalité - en raison d'erreurs systématiques non corrigées dans les données concernant les survivants des bombardements de Hiroshima et de Nagasaki et les doses de rayon-X reçues par des patients souffrant de spondylarthrite ankylosante. Si l'énergie nucléaire <sup>devait faire une percée</sup>, il nous faudra être plus honnêtes et plus francs à l'égard du public et trouver le moyen d'empêcher que des incidents mineurs ne dégénèrent en accidents majeurs, principalement en raison de défaillances humaines.

### MOTS-CLES

Accidents, PWR (Réacteur à eau pressurisée)  
TMI-2, gaz nobles.

### INTRODUCTION

Avant de commencer mon exposé, il est peut-être utile de préciser que je ne suis pas un "anti-nucléaire", c'est-à-dire un adversaire fanatique de l'énergie nucléaire, mais je ne suis pas non plus un partisan inconditionnel du nucléaire, comme la plupart des zélateurs qui "militent" dans ce domaine et dans les industries connexes. Beaucoup d'adversaires du nucléaire sont mal informés et souffrent d'une telle phobie du rayonnement ionisant industriel, qu'ils craignent des doses de l'ordre de 1 millirem par an, dès l'instant où celles-ci proviennent d'une usine productrice d'énergie électronucléaire, plus qu'ils ne redoutent les doses de l'ordre de 200 millirems qu'ils pourraient absorber au cours d'actes médicaux, notamment de diagnostics absolument superflus, de même qu'ils ignorent souvent les risques qu'ils courent en absorbant des hydrocarbures et des éléments tels que  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ , ou en inhalant des aérosols provenant d'installations fonctionnant au combustible fossile. De leur côté, les zélateurs typiques du nucléaire sous-estiment systématiquement de plus d'un ordre de grandeur, les risques inhérents aux radiations ionisantes; ils ne disent que des demi-vérités et cherchent souvent à occulter et même à censurer l'information, afin de ne pas effrayer le public. Les membres de ce clan sont souvent très arrogants et semblent adopter l'attitude du "père qui sait ce qui convient le mieux au public stupide". Ils s'y entendent à merveille pour obtenir l'appui de l'industrie et du gouvernement et sont fort habiles à manipuler les chiffres et à minimiser le coût d'ensemble de l'énergie nucléaire, en "omettant" de prendre en considération certains frais à l'élimination des déchets radioactifs, au déclassement d'installations, aux accidents, etc.

Je suis partisan de l'énergie nucléaire mais pas à n'importe quel prix, ni aux dépens d'autres sources d'énergie. Je pense que nous avons fait, et que nous continuons de faire, de graves erreurs et des choix inadéquats en ce qui concerne l'énergie électronucléaire. Je considère que certaines centrales nucléaires sont d'une conception peu satisfaisante, qu'elles sont mal situées et qu'elles sont peu sûres. J'estime d'ailleurs que certaines d'entre elles devraient être fermées pour des raisons de sécurité et notamment en raison des taux d'exposition professionnelle élevés et du risque d'irradiation important pour des populations numériquement fortes. Je vais donc faire tout ce qui est en mon pouvoir pour contribuer à ce que les opérations de production d'énergie électronucléaire (y compris l'ensemble du cycle nucléaire) deviennent aussi sûres que possible. A cet effet, je vais chercher à comprendre et à rendre intelligible aux autres tous les risques inhérents aux radiations ionisantes, de telle sorte que chacun puisse faire des choix d'énergies en connaissance de cause. Un petit nombre d'opérations nucléaires contribuent pleinement à la sécurité d'exploitation, tandis que d'autres vont à l'opposé.

Disons donc d'emplée que, par la force des choses, une bonne partie de mon exposé et des discussions qui pourraient en découler sera fondée sur des hypothèses et consistera par conséquent en conjectures et en suppositions sur ce qui pourrait arriver en cas d'accident majeur survenant dans une centrale génératrice d'énergie électronucléaire. Cela est dû au fait que l'énergie nucléaire est relativement nouvelle et que le seul accident qui s'est produit dans une centrale nucléaire ( TMI-2 ) a eu des conséquences très graves. On a enregistré des accidents encore plus graves dans des réacteurs de recherche et dans des réacteurs produisant du plutonium mais ils ne figurent pas à l'ordre du jour de la présente conférence. Le Tableau I donne un calendrier de

mise en service des premières centrales nucléaires montrant que, dans l'ensemble, notre expérience en matière de production d'énergie électronucléaire ne couvre que deux décennies et une seule décennie en ce qui concerne les réacteurs modernes de 1000 MWe et les surgénérateurs expérimentaux (LMFBR<sup>\*</sup>). Il faut noter aussi qu'au début, les premières centrales électronucléaires commerciales installées au Royaume-Uni fonctionnaient à 50 MWe; leur mise en service, en septembre 1956, a été suivie de près par la mise en exploitation de centrales nucléaires en URSS et en France.

TABLEAU 1

Date de mise en service	Puissance MWe	Pays	Nom/lieu et type de réacteur
Sept. 1956	chaque réacteur	50 R.-U.	Calder-Hall (1-4) GCR
Nov. 1958		50 R.-U.	Chapel Cross(1-4) GCR
Déc. 1958		100 URSS	Sibérie (1-6) LGR
Avril 1959	40	France	Marcoule G2 (Gard)GCR
Juin 1973	1100	E.-U.	Zion 1 - PWR(réacteur à eau pressurisée)
Déc. 1973	233	France	Phoenix (Gard) surgénérateur - LMFBR
Déc. 1973	350	URSS	Chevtchenko (BN-350) surgénérateur - LMFBR

Les premières centrales ont toutes été exploitées, à des niveaux de puissance relativement faibles et c'est seulement en juin 1973 que les Etats-Unis ont mis en exploitation une première centrale fonctionnant à plus de 1000 MWe. Il s'agissait d'un réacteur à eau pressurisée ( PWR ), du type qui nous préoccupe particulièrement à la présente conférence.

\* LMFBR = Liquid Metal Fast Breeder Reactor.

Certains d'entre nous ont également de sérieuses réserves à formuler en ce qui concerne l'exploitation commerciale des surgénérateurs LMFBR. Le premier de ceux-ci a été mis en exploitation commerciale en décembre 1973, en France, il s'agit du surgénérateur Phoenix. Aux Etats-Unis, 177 centrales représentant plus de la moitié de la capacité de production d'énergie électronucléaire du monde, sont soit en exploitation, soit à divers stades de leur construction. Cependant, à l'heure actuelle, notre expérience en matière d'exploitation est encore beaucoup trop limitée pour nous permettre de faire des évaluations de risques d'accidents importants dans des réacteurs pouvant avoir une signification statistique. Cette expérience limitée ne nous fournit donc pas de base adéquate pour juger de la fréquence ou de la gravité probables d'accidents majeurs, dans la production d'énergie électronucléaire, qui aient été reconnus comme risquant de se produire seulement une fois sur plus d'un million d'années/réacteur. Rasmussen ( 1975 ) donne cependant une probabilité de fusion d'un coeur de réacteur PWR - représentant un accident de 1ère catégorie - équivalente à  $9 \times 10^{-7}$  par année/réacteur.

Aux Etats-Unis, deux études importantes ont été entreprises sur la probabilité et les conséquences d'accidents de centrales de production d'énergie électronucléaire. La première : WASH-740 , entreprise par un groupe de chercheurs au Laboratoire national de Brookhaven ( 1957 ) a été préparée principalement pour servir de base au Price-Anderson Act, loi controversée, instituant un système d'indemnisation en cas d'accidents importants dans des centrales de production d'énergie électronucléaire. Le rapport Brookhaven a été très critiqué par les représentants de l'industrie nucléaire qui ont prétendu, d'une part, qu'il exagérât fortement les risques, en admettant des fuites de radioactivité dans l'environnement, plus importantes que cela n'était probable ou même possible et, d'autre part, qu'il contenait des

dispositions inadéquates en vue de l'évacuation des populations exposées, ainsi que des hypothèses conduisant à des estimations du nombre des décès et des maladies, jugées trop élevées, d'environ deux ordres de grandeur. Il en est résulté qu'une étude beaucoup plus coûteuse et approfondie a été entreprise; elle représente l'effort de 70 hommes-année et son prix s'élève à quatre millions de dollars. Il s'agit du rapport Rasmussen ( 1975). Ce rapport, (WASH-1400), dont les conclusions sont beaucoup moins pessimistes que celles de l'étude WASH-740 en ce qui concerne la gravité des conséquences d'un accident électronucléaire, est résumé au Tableau 2 qui donne, à titre de comparaison, les valeurs correspondantes de WASH-740.

TABLEAU 2. Comparaison relative aux conséquences d'accidents risquant de survenir dans un réacteur de 500 MWe ( 160 MWe), selon les calculs présentés dans le rapport Brookhaven et selon les prévisions du rapport Rasmussen ( 1975 )

Paramètres	Wash-740 Max.	WASH-1400	
		Max.	Moyenne
Mort *	3400	92	0,05
Maladie aiguë *	43 000	200	0,01
Dommage total (dollars)	$1 \times 10^{10}$ **	$1,7 \times 10^9$	$5,1 \times 10^8$
Risque approximatif par réacteur	--	$10^{-9}$	$10^{-4}$

\* Il convient de multiplier ces valeurs par 6 pour obtenir les nombres probables de morts et de maladies aiguës pour un réacteur d'une puissance de 1000 MWe.

\*\* La valeur de  $7 \times 10^9$  dollars (1957) indiquée dans le rapport Brookhaven a été convertie en  $1 \times 10^{10}$  dollars (1973), aux fins de la comparaison avec les valeurs-1973 publiées dans le rapport Rasmussen (1975). Il convient de multiplier par 1,6 les valeurs Brookhaven et Rasmussen, rapportées ici, pour obtenir la conversion en dollars 1981. Toutes les valeurs contenues dans ce tableau doivent être révisées en hausse pour être applicables à des installations modernes de production d'énergie électronucléaire d'une capacité de 1000 MWe ou plus.

D'emblée, le rapport Rasmussen fut chaleureusement accueilli par l'Atomic Energy Commission des Etats-Unis et par les milieux industriels intéressés à la production d'énergie électronucléaire. Pendant une période de deux à trois années, ce rapport a servi de "Bible" car il était considéré comme contenant des estimations de référence "fiables" en ce qui concerne les probabilités d'accidents de réacteur de diverses importances et comme fournissant "les meilleures estimations" de risques et de conséquences. Toutefois, des incidents graves ont souvent failli se produire dans des centrales électronucléaires fonctionnant à des puissances comprises entre 900 et 1100 MWe. Des accidents se sont d'ailleurs réellement produits, par exemple celui de Brown's Ferry (1067 MWe, BWR), du 22 mars 1975, qui a coûté plusieurs millions de dollars, et celui du réacteur PWR Davis-Besse (906 MWe), en septembre 1977. L'accident du réacteur Brown's Ferry a été provoqué par un inspecteur qui utilisait une bougie pour vérifier des fuites d'air et qui, ce faisant, a mis le feu à l'isolation d'une conduite de câble de commande. Il était d'assez mauvais augure que l'installation Davis-Besse soit l'un des 8 réacteurs PWR construits par Babcock & Wilcox Co, en service aux Etats-Unis à l'époque de l'accident TMI-2 car TMI-2 était aussi l'un de ces 8 réacteurs de B. & W.. Dans le cas de Davis-Besse, comme dans celui de TMI-2, l'accident était imputable à une conduite d'eau d'alimentation transitoire. Je pense que cette série d'accidents est à l'origine du fait que la Nuclear Regulatory Commission des Etats-Unis (USNRC) a indiqué, quelques semaines avant l'accident TMI-2, qu'elle était déçue du rapport Rasmussen et qu'elle ne prendrait plus ce rapport comme base de ses estimations. Il convient de rappeler encore que la General Public Utilities Corp., société affiliée à la firme Metropolitan Edison (exploitant TMI-1 et TMI-2) a présenté une demande d'indemnisation de 4 milliards de dollars à la Nuclear Regulatory Commission des Etats-Unis (USNRC) en alléguant que cette agence gouvernementale avait négligé



d'informer les entreprises de services publics des conditions dans lesquelles un enchaînement d'évènements comme celui qui s'était déroulé à la centrale Davis-Besse risquait de provoquer un accident du type TMI-2, lequel s'est produit, en fait, le 28 mars 1979. Comme on pouvait s'y attendre l'USNRC a rejeté la responsabilité de l'accident TMI-2 et, sur ces entrefaites, la General Public Utilities Corp. a annoncé qu'elle poursuivrait la NRC en justice. (Remarque - comme on le voit, ce ne sont pas seulement les enfants qui s'accusent mutuellement d'avoir volé les bonbons... Les grandes entreprises de services publics et les administrations gouvernementales agissent exactement de la même manière en cherchant à faire endosser aux autres les responsabilités qu'elles ne veulent pas assumer !) Les personnes intéressées à avoir un aperçu des principaux accidents de centrales électronucléaires qui se sont produits dans le monde peuvent se référer à une publication de Bertini (1980). Vingt-neuf accidents de ce genre sont décrits dans cette publication, par référence à un ou plusieurs des sept critères de sévérité suivants : l'accident

- 1) a provoqué la mort ou des lésions corporelles graves;
- 2) a libéré une radioactivité importante hors du site;
- 3) a endommagé le coeur du réacteur;
- 4) a causé des dommages importants à l'équipement;
- 5) a engendré une situation critique, par inadvertance;
- 6) a créé un risque potentiel d'accident grave;
- 7) a entraîné d'importants frais de réparation.

Estimations des probabilités d'accident dans les réacteurs de centrales de production d'énergie électronucléaire, selon le rapport Rasmussen

Les auteurs du rapport Rasmussen ( 1975 ) ont utilisé la méthode de l'analyse de "l'arbre des évènements" pour définir certaines défaillances de système dont il était

nécessaire de connaître les probabilités pour pouvoir déterminer le risque. Ensuite, ils ont utilisé la méthode de "l'arbre des fautes" pour évaluer la majorité de ces probabilités de défaillance. Ils ont pris soin de tenir compte des divers modes habituels de défaillance, c'est-à-dire du fait que les événements ne sont pas nécessairement indépendants et qu'une défaillance unique peut augmenter la probabilité d'une ou plusieurs défaillances additionnelles, ou du fait que la cause d'une panne des dispositifs de commande ou de sécurité peut entraîner la défaillance d'autres dispositifs. Après la quantification des arbres de fautes, le stade de la quantification des arbres d'événements permet de combiner les probabilités individuelles pour chaque arbre de fautes et d'obtenir ainsi les probabilités de séquence d'accidents. Tous les calculs ont été basés sur des types de réacteurs modernes, générateurs d'énergie électronucléaire, d'une capacité de 1000 MWe, PWR et BWR, à eau légère (LWR). Les différences entre les courbes des fonctions effets/probabilité des réacteurs PWR et BWR étaient inférieures à leurs caractéristiques respectives d'incertitude propre, de telle sorte que les résultats moyens pouvaient s'appliquer indifféremment à n'importe lequel des deux types de système de réacteur utilisés couramment aux Etats-Unis, où 65% des réacteurs générateurs d'énergie électronucléaire, en exploitation ou à divers stades de construction, sont de type PWR et 34% de type BWR. Le Tableau 3 donne un résumé des risques des divers types d'accidents de réacteurs électronucléaires, tels qu'ils découlent de la figure 5-3 et de la figure 5-8 du rapport Rasmussen ( 1975 ).

TABEAU 3. Probabilité de risques d'importances diverses liés à l'exploitation de réacteurs électronucléaires de 1000 MWe, selon le rapport Rasmussen ( 1975 )

Types d'effet d'accident	Ordre de grandeur	Probabilités par année/réacteur
Fusion du coeur du réacteur		$5 \times 10^{-5}$
Issues fatales (décès prématurés)	1	$4,5 \times 10^{-7}$
	10	$3 \times 10^{-7}$
	100	$10^{-7}$
	1000	$10^{-8}$
Accident maximum probable (3500 morts)		$10^{-9}$
Cas de maladie (conséquence directe)	1	$7 \times 10^{-6}$
	10	$5,3 \times 10^{-6}$
	100	$2 \times 10^{-6}$
	1000	$3 \times 10^{-7}$
	$10^4$	$2 \times 10^{-8}$
Cas d'effets génétiques par année	1	$1,5 \times 10^{-5}$
	10	$3,5 \times 10^{-6}$
	100	$1,5 \times 10^{-8}$
Dommages évalués en en dollars des Etats-Unis	$10^6$	$4,5 \times 10^{-5}$
	$10^7$	$3,3 \times 10^{-5}$
	$10^8$	$1,2 \times 10^{-5}$
	$10^9$	$7,5 \times 10^{-7}$
	$10^{10}$	$4 \times 10^{-9}$
Cas de mort par cancer latent par année	1	$2,5 \times 10^{-5}$
	10	$1,2 \times 10^{-5}$
	100	$2 \times 10^{-6}$
	1000	$5 \times 10^{-9}$
Cas de nodules thyroïdiens par année	1	$3,3 \times 10^{-5}$
	10	$2,5 \times 10^{-5}$
	100	$1,5 \times 10^{-5}$
	1000	$1,7 \times 10^{-6}$
	8000	$10^{-9}$
Accident nécessitant la décontamination de superficies irradiées (en $mi^2$ )	0.1	$5 \times 10^{-5}$
	1	$4 \times 10^{-5}$
	10	$1,8 \times 10^{-5}$
	100	$1,6 \times 10^{-6}$
	1000	$3 \times 10^{-6}$

L'un des principaux objectifs de la présente conférence est d'évaluer les diverses estimations de probabilité d'occurrence d'accidents dans les réacteurs générateurs d'énergie électronucléaire et leurs conséquences nuisibles. Ainsi, nous désirerions savoir véritablement dans quelle mesure les estimations du rapport Brookhaven (1957) étaient peu fiables et jusqu'à quel point les estimations Rasmussen (1975) qui les ont remplacées étaient précises et fiables. Je ne prétends pas répondre à ces questions, parce que je ne suis pas un sage, ni un prophète. Il est possible qu'un gitan, diseur de bonne aventure, donnerait une meilleure réponse à cette question, à laquelle - j'en suis sûr - Salomon lui-même aurait hésité à répondre. La difficulté ne réside pas tant dans l'évaluation de la probabilité de défaillance de l'équipement fabriqué par l'homme mais plutôt dans la gageure presque impossible à tenir, de deviner ce que l'homme pourrait faire s'il était soudainement placé devant un éventail de choix dont certains devraient être faits en toute hâte tandis que d'autres pourraient entraîner un désastre, s'ils étaient faits dans un ordre inadéquat. Je suis de ces gens qui croient que nous parviendrions à une exploitation plus sûre des réacteurs générateurs d'énergie électronucléaire, si ceux-ci étaient exploités par des ordinateurs, au lieu d'être confiés à des opérateurs spécialisés et "hautement qualifiés". TMI-2 n'aurait jamais eu de conséquences aussi graves si la gestion de ce réacteur avait été laissée à un ordinateur. Avec les opérateurs humains, la difficulté réside dans le fait qu'ils prennent souvent des mesures correctives qui ne font qu'aggraver la situation et il leur arrive de prendre prématurément des mesures pour maintenir le réacteur en fonctionnement, alors qu'il existe cependant un faible indice montrant qu'il devrait être mis hors de service. Il est vrai qu'à court terme l'ordinateur ne sera pas capable de gérer un nombre de MWh aussi élevé que peut le faire un opérateur humain spécialisé. Toutefois, on pourrait admettre que, sur la durée de vie d'un réacteur, il en résulterait

moins d'accidents et de pannes. Je ne pense pas non plus que l'ordinateur serait aussi soucieux des prix de revient que peut l'être un opérateur. L'infériorité de l'être humain par rapport à l'ordinateur provient de la limite de vitesse de fonctionnement du cerveau, notamment en ce qui concerne l'extraction de l'information et son traitement, quels que soient l'intelligence, le calme et l'entraînement de l'opérateur. En effet, aussi qualifié soit-il, l'opérateur humain peut se trouver soudain confronté à cinquante possibilités d'action différentes. Il ne sera jamais assuré de choisir la meilleure de ces cinquante possibilités parce qu'il lui faudra un certain temps pour réaliser, par l'esprit, les conséquences ultimes de chacune des solutions possibles. Il faut donc avoir un jugement singulièrement rapide lorsqu'on ne dispose que de quelques secondes pour décider. Quant à l'ordinateur, il connaît tous les chiffres et il a pratiquement tout calculé d'avance, dans le calme et sans précipitation. Il est parfaitement capable d'évaluer chacune des combinaisons concevables d'évènements jusqu'à son aboutissement final et, en cas de doute, il met le réacteur hors service. L'ordinateur a l'avantage de disposer de quelques millisecondes d'une information "compressée" que son maître est obligé d'élaborer dans son esprit, pendant des périodes de plusieurs jours ou de plusieurs semaines; de plus, l'ordinateur "oublie" très rarement ses instructions. Il n'est évidemment pas infail-  
lible mais, j'estime qu'avec une assistance adéquate, l'ordinateur est capable de faire des choix plus sûrs et souvent moins hâtifs que ceux qui sont parfois élaborés dans l'excitation et la confusion par l'opérateur responsable en cas d'urgence impérative. Que l'énergie nucléaire soit acceptable, c'est indiscutable... mais nous devons trouver le moyen d'empêcher que des évènements d'importance mineure et des incidents sans gravité ne dégénèrent en accidents importants de classe IX (accidents de fusion du noyau de réacteur des catégories PWR-1 à PWR-7 envisagés dans le rapport Rasmussen (1975). Si l'on se réfère à ce rapport, aucune des

catégories PWR envisagées ne correspond exactement à l'accident TMI-2, mais la moyenne de probabilité d'accident de fusion du coeur de réacteur des catégories PWR-3 à PWR-7 est d'environ  $5 \times 10^{-6}$  et, dans la généralité des cas de fusion du coeur, l'estimation prudente est de  $5 \times 10^{-5}$  par année/réacteur. En conséquence, comme on le voit, selon la moyenne admissible, un accident du type TMI-2 ne peut se produire qu'une seule fois en 20 000 à 200 000 ans, par réacteur. En d'autres termes, pour les 73 réacteurs qui sont actuellement en exploitation aux Etats-Unis, nous pourrions nous attendre à ce qu'un seul accident de ce genre se produise en 27 à 2700 ans. Ainsi, il semble que nous ayons été très malchanceux lors de l'accident TMI-2 ou alors il faut se demander si l'estimation Rasmussen n'est pas suffisamment prudente et si, à défaut de mesures efficaces pour les éviter, nous devons nous attendre à des accidents graves et d'une fréquence relativement élevée dans les réacteurs, compte tenu du fait qu'actuellement plus de 500 réacteurs générateurs d'énergie électronucléaire sont en exploitation ou en construction dans le monde. Peut-être voudrait-on incriminer plus spécifiquement les réacteurs B & W, de type PWR, mais je crois, pour ma part, qu'à bien des égards ils sont au contraire plus sûrs que ceux d'autres constructeurs. Peut-être que - sous certains aspects - les surgénérateurs sont plus sûrs que les réacteurs PWR, comme le suggère le rapport Rasmussen (1975), lequel donne une probabilité, par réacteur-année, d'accidents aboutissant à une issue fatale immédiate comme égale à  $1,2 \times 10^{-7}$  pour le surgénérateur et à  $6,2 \times 10^{-7}$  pour le PWR. Toutefois, comme on l'a indiqué plus haut, ce rapport précise que cette différence est statistiquement sans signification. La prévision Rasmussen d'un accident du type TMI-2 est un peu meilleure si nous prenons en considération les 300 années-réacteur de production d'énergie électronucléaire aux Etats-Unis car, dans ces conditions, il faut admettre qu'un accident de ce genre peut se produire tous les 70 à 700 ans, mais ce n'est là qu'une piètre consolation.

Pour ce qui est des surgénérateurs nous avons beaucoup moins d'expérience qu'avec les réacteurs à eau légère, parce qu'à l'heure actuelle, seuls quatre réacteurs de ce genre sont en exploitation commerciale. Aux Etats-Unis, la première expérience en matière de surgénérateur a été décevante. Le surgénérateur expérimental Fermi a été achevé en 1966 et ses premiers essais de fonctionnement ont abouti à un échec spectaculaire : le coeur du réacteur a partiellement fondu. Pour ma part, j'estime qu'il n'existe aucun moyen de rendre les surgénérateurs plus sûrs que les réacteurs à eau légère (LWR). En fait, dès le début, je me suis fermement opposé aux programmes de surgénérateurs LMFBR, principalement pour deux raisons. D'une part, je pense qu'un important déploiement de telles installations aurait pour effet d'augmenter considérablement les risques de prolifération des armes nucléaires. En notre époque de piraterie et d'opérations clandestines, le combustible frais destiné à ces installations peut constituer un butin très tentant et un instrument de chantage d'une valeur inestimable. Le plutonium contenu dans ce combustible ne pourrait être utilisé pour fabriquer des armes aussi efficaces que celles qui contiennent du plutonium d'une qualité appropriée, en raison du pourcentage élevé de Pu-238 et de Pu-240, bien que, dans ce combustible recyclé destiné aux surgénérateurs LMFBR, ce pourcentage soit inférieur à celui qu'on trouve dans le combustible destiné aux réacteurs à eau légère. Cependant, même des armes d'une puissance destructive de 50 000 T subrepticement placées à Washington ou à New York quelques mois après le vol d'une livraison de combustible destinée à un réacteur, permettrait de soumettre le président des Etats-Unis à la manoeuvre de chantage la plus grave qui ait jamais été imaginée dans notre pays. De telles armes pourraient être fabriquées en quelques semaines seulement, à la suite d'un vol de combustible frais pour LMFBR, à condition qu'au préalable certains préparatifs relativement simples aient été accomplis avant l'exécution de l'acte de piraterie.

La deuxième raison pour laquelle je suis opposé au surgénérateur LMFBR est fondée sur le fait que ce type d'installation fonctionne selon le cycle de combustible au plutonium et parce que les radionuclides de plutonium et autres éléments radioactifs dérivés créent un risque d'irradiation inacceptable. Il y a évidemment beaucoup d'autres raisons pour lesquelles je me suis opposé au surgénérateur LMFBR, parmi celles-ci je mentionnerai les risques inhérents à certaines installations utilisant le Na comme réfrigérant, le coût élevé de ce type de réacteur, son long délai de "doublement" et son faible coefficient de surgénération, ainsi que son inefficacité relative par rapport à d'autres systèmes de surgénérateurs. Je pense que tous les surgénérateurs LMFBR<sup>re</sup> devraient être implantés<sup>que</sup> dans des régions éloignées des zones fortement peuplées et devraient être surveillés et contrôlés par les Nations Unies ou par une institution telle que l'AIEA, extrêmement renforcée. Les surgénérateurs fonctionnant selon le cycle Th-U-233 ont l'avantage d'être exempts de plusieurs caractéristiques indésirables des LMFBR. Cela est dû au fait que le combustible U-233 contient suffisamment de U-232 et de U-234 pour que le rayonnement gamma intense entrave sérieusement la piraterie et les opérations clandestines pouvant conduire à la fabrication d'armes, tandis que la dilution de U-233 avec U-238 allongerait considérablement le délai nécessaire pour parvenir à organiser et à réaliser des opérations clandestines efficaces. D'autre part, j'estime que dans le monde instable où vit notre société, il est important que les hommes consacrent plus de temps à apprendre à vivre en paix ensemble. Le Tableau 4 contient les données de Pigford (1974), faisant apparaître les raisons pour lesquelles le surgénérateur LMFBR est plus dangereux du point de vue de la prolifération et de l'accumulation d'éléments transuranniques radioactifs. Pour la fabrication d'armes clandestines, le combustible retraité des surgénérateurs LMFBR est d'une utilisation plus aisée car il pose moins de problèmes en ce qui concerne la



production de chaleur, la fission et la dilution spontanées, en raison de sa teneur plus faible en Pu-238 et en Pu-240 comparativement à celle du combustible des réacteurs LWR qui sont alimentés à l'uranium. Il est important de noter que le combustible frais destiné aux surgénérateurs LMFBR comme celui des réacteurs LWR n'émettent pas un rayonnement intense à partir de leurs produits de fission. La première charge d'un surgénérateur LMFBR correspond probablement à celle fournie par des réacteurs LWR, avec une teneur en isotopes de plutonium, comme cela est indiqué au Tableau 4 (p.18), tandis que les premières recharges correspondent à la composition indiquée pour le combustible de LMFBR.

Evaluation des conséquences d'un accident de réacteur électronucléaire selon les rapports Brookhaven et Rasmussen

Le rapport Brookhaven (1957) envisageait divers types d'accidents importants pouvant survenir dans des installations de réacteur électronucléaire et leurs conséquences dans trois cas : 1) cas circonscrit, 2) cas de libération volatile, et 3) cas de libération de 50% de tous les produits de fission. Dans le premier cas, le rapport conclut qu'il n'y aurait aucune irradiation mortelle, ni aucune lésion corporelle à condition que l'évacuation se fasse en deux heures. En revanche, il faudrait s'attendre à 6 lésions corporelles si l'évacuation se faisait en 24 heures. Dans le deuxième cas, si tous les produits de fission volatile et 1% du strontium étaient libérés, le rapport Brookhaven conclut qu'il y aurait 2 cas d'irradiation mortels, dans des conditions météorologiques entraînant une baisse de température, tandis qu'il faudrait s'attendre à 900 cas d'irradiation mortels s'il se produisait une inversion de température au moment de la libération de la radioactivité. Les cas de lésions corporelles, correspondant à ces deux conditions météorologiques, seraient de 10 et 13 000 respectivement. Pour le troisième cas, le rapport prévoit qu'il n'y aurait aucune irradiation mortelle pour une libération "chaude" (comme indiqué au Tableau 2) et 3400 pour une libération "froide".

**TABEAU 4.** Comparaison du combustible brûlé provenant respectivement d'un réacteur LWR de 1000 MWe et d'un surgénérateur LMFBR avec les valeurs de risque relatif pour des éléments radioactifs donnés

Périodes de $\frac{1}{2}$ valeur des isotopes (a) (b) Risque relatif	Activité du combustible retraité annuellement (Ci/y) pour:		% en fonction du poids de Pu dans le combustible retraité	
	LWR (1)	LMFBR (1)	LWR (1)	LMFBR (1)
Pu-236 2.85(a) 3.5x10 <sup>9</sup> -	0.85x10 <sup>4</sup>	0.9	0.007	10 <sup>-6</sup>
Pu-238 86.4(a) 4.3x10 <sup>10</sup> (b) 152	7.57x10 <sup>4</sup>	2.68x10 <sup>5</sup>	1.8	0.77
Pu-239 24,360(a) 5.5x10 <sup>15</sup>	8.89x10 <sup>3</sup>	0.81x10 <sup>5</sup>	59.3	66.9
Pu-240 6,580(a) 1.2x10 <sup>11</sup> (b) 3.8	1.29x10 <sup>4</sup>	1.00x10 <sup>5</sup>	24.0	22.4
Pu-241 13.2(a) -(b) 3.2	3.10x10 <sup>6</sup>	1.34x10 <sup>7</sup>	11.1	6.1
Pu-242 3.79x10 <sup>5</sup> (a) 7.1x10 <sup>10</sup> (b) 6.2x10 <sup>-2</sup>	37	292	3.8	3.8
Am-241 460(a) 2x10 <sup>14</sup> (b) 16	6.25x10 <sup>3</sup>	3.71x10 <sup>4</sup>	-	-
Am-242m 152(a) -(b) 50	1.10x10 <sup>2</sup>	1.87x10 <sup>3</sup>	-	-
Am-242 1.8x10 <sup>-3</sup> (a) -(b) 7.5x10 <sup>-3</sup>	1.10x10 <sup>2</sup>	1.87x10 <sup>3</sup>	-	-
Am-243 7.95x10 <sup>3</sup> (a) -(b) 0.97	4.74x10 <sup>2</sup>	1.07x10 <sup>3</sup>	-	-
Cm-242 0.447(a) 7.2x10 <sup>6</sup> (b) 2.4	3.13x10 <sup>5</sup>	1.10x10 <sup>6</sup>	-	-
Cm-243 32(a) -(b) 45	1.09x10 <sup>2</sup>	8.31x10 <sup>2</sup>	-	-
Cm-244 18.1(a) 1.4x10 <sup>7</sup> (b) 32	6.78x10 <sup>4</sup>	2.65x10 <sup>4</sup>	-	(1) de T.H.Pigford(1974) (2) de K.Z.Morgan (1964)

Les nombres de cas de lésions corporelles à prévoir pour ces deux conditions météorologiques seraient respectivement de 0 et de 43 000. Toutes ces valeurs ont été indiquées pour une petite centrale électronucléaire d'une puissance ne dépassant pas 500 MW<sub>t</sub> ou 165 MWe, de sorte qu'il faudrait multiplier ces chiffres par 1000/165 = 6 pour permettre une comparaison avec les valeurs s'appliquant à un réacteur moderne ou à celles contenues dans le rapport Rasmussen (1975). En ce qui concerne la probabilité de libération de radioactivité, les évaluations du rapport Brookhaven étaient de simples opinions d'experts connus. Leurs estimations de risques d'accidents par année et par réacteur étaient :  $10^{-2}$  à  $10^{-4}$  pour le cas 1),  $10^{-3}$  à  $10^{-4}$  pour le cas 2) et  $10^{-5}$  à  $10^{-9}$  pour le cas 3). Il faut noter que ces estimations sont beaucoup plus fortes que celles contenues dans le rapport Rasmussen (1975), résumées au Tableau 3.

Le rapport Rasmussen (1975) envisage 9 catégories d'accidents pour les réacteurs PWR et 5 catégories pour les réacteurs BWR. Les accidents PWR-1 et BWR-1, qui se réfèrent aux libérations les plus importantes d'éléments radioactifs dans chacun de ces types de réacteurs, impliquent des explosions en chaîne et une rupture du réacteur, avec fuite éventuelle de radioactivité hors de l'enceinte du bâtiment du réacteur. La fusion du coeur du réacteur se produirait dans les catégories d'accidents PWR-1, 2, 3, 4, 5, 6, et 7, ainsi que dans les catégories BWR-1, 2, 3, et 4. Le Tableau 5 donne les probabilités Rasmussen de libération de radioactivité, le délai d'avertissement pour l'évacuation et les fractions d'éléments radioactifs libérés du coeur du réacteur, considérées comme la menace la plus grave de lésions corporelles et de mort par irradiation pour la collectivité avoisinante.

TABLEAU 5. Sommaire d'accidents pouvant survenir dans des coeurs

de réacteur à 1000 MWe<sup>(c)</sup>

Catégorie(d)  
Probabilité  
par année/  
par réacteur

Délai d'évacuation(e)	Fractions d'éléments de coeur libérées							
	Xe+Kr	Org I	I	Cs+Rb	Te+Sb	Ba+Sr	Ru(a)	La(b)
PWR-1 <sub>7</sub> (d) 9x10 <sup>-7</sup> 1(e)	0.9	6x10 <sup>-3</sup>	0.7	0.4	0.4	0.05	0.4	3x10 <sup>-3</sup>
PWR-2 <sub>6</sub> (d) 8x10 <sup>-6</sup> 1(e)	0.9	7x10 <sup>-3</sup>	0.7	0.5	0.3	0.06	0.02	4x10 <sup>-3</sup>
PWR-3 <sub>6</sub> (d) 4x10 <sup>-6</sup> 2(e)	0.9	6x10 <sup>-3</sup>	0.2	0.2	0.3	0.02	0.03	3x10 <sup>-3</sup>
PWR-4 <sub>7</sub> (d) 5x10 <sup>-5</sup> 2(e)	0.6	2.x10 <sup>-3</sup>	0.09	0.04	0.03	5x10 <sup>-3</sup>	3x10 <sup>-3</sup>	4x10 <sup>-4</sup>
PWR-5 <sub>7</sub> (d) 7x10 <sup>-5</sup> 1(e)	0.3	2x10 <sup>-3</sup>	0.03	9x10 <sup>-3</sup>	5x10 <sup>-3</sup>	1x10 <sup>-3</sup>	6x10 <sup>-4</sup>	7x10 <sup>-5</sup>
PWR-6 <sub>6</sub> (d) 6x10 <sup>-6</sup> 1(e)	0.3	2x10 <sup>-3</sup>	8x10 <sup>-4</sup>	8x10 <sup>-4</sup>	1x10 <sup>-3</sup>	9x10 <sup>-5</sup>	7x10 <sup>-5</sup>	1x10 <sup>-5</sup>
PWR-7 <sub>5</sub> (d) 4x10 <sup>-5</sup> 1(e)	6x10 <sup>-3</sup>	2x10 <sup>-5</sup>	2x10 <sup>-5</sup>	1x10 <sup>-5</sup>	2x10 <sup>-5</sup>	1x10 <sup>-6</sup>	1x10 <sup>-6</sup>	2x10 <sup>-7</sup>
PWR-8 <sub>5</sub> (d) 4x10 <sup>-5</sup> N/A(e)	2x10 <sup>-3</sup>	5x10 <sup>-6</sup>	1x10 <sup>-4</sup>	5x10 <sup>-4</sup>	1x10 <sup>-6</sup>	1x10 <sup>-8</sup>	0	0
PWR-9 <sub>4</sub> (d) 4x10 <sup>-4</sup> N/A	3x10 <sup>-6</sup>	7x10 <sup>-9</sup>	1x10 <sup>-7</sup>	6x10 <sup>-7</sup>	1x10 <sup>-7</sup>	1x10 <sup>-11</sup>	0	0
BWR-1 <sub>6</sub> (d) 1x10 <sup>-6</sup> 1.5(e)	1	7x10 <sup>-3</sup>	0.4	0.4	0.7	0.05	0.5	5x10 <sup>-3</sup>
BWR-2 <sub>6</sub> (d) 6x10 <sup>-6</sup> 2(e)	1	7x10 <sup>-3</sup>	0.9	0.5	0.3	0.1	0.03	4x10 <sup>-3</sup>
BWR-3 <sub>5</sub> (d) 2x10 <sup>-5</sup> 2(e)	1	7x10 <sup>-3</sup>	0.1	0.1	0.3	0.01	0.02	3x10 <sup>-3</sup>
BWR-4 <sub>6</sub> (d) 2x10 <sup>-6</sup> 2(e)	0.6	7x10 <sup>-4</sup>	8x10 <sup>-4</sup>	5x10 <sup>-3</sup>	4x10 <sup>-3</sup>	6x10 <sup>-4</sup>	6x10 <sup>-4</sup>	
BWR-5 <sub>4</sub> (d) 1x10 <sup>-4</sup> N/A(e)	5x10 <sup>-4</sup>	2x10 <sup>-9</sup>	6x10 <sup>-11</sup>		4x10 <sup>-9</sup>	8x10 <sup>-12</sup>	8x10 <sup>-14</sup>	

(a) comprend : Mo, Rh, Tc et Co

(d) catégorie de libération

(b) comprend : Nd, Y, Ce, Pr, Nb, Am, Cm, Pu, Np et Zr

(c) extrait de référence Rasmussen (1975) (e) Avis de délai d'évacuation

Sous-estimation des probabilités et des risques d'accidents dans des réacteurs électronucléaires, par la Nuclear Regulatory Commission des Etats-Unis (USNRC) et par ses mandataires dans les rapports Brookhaven et Rasmussen

Comme on l'a indiqué plus haut, l'un des principaux motifs pour lesquels l'Atomic Energy Commission des Etats-Unis (USNRC) souhaitait que le rapport Brookhaven soit préparé en 1957 venait de son désir de disposer d'une meilleure base de calcul des indemnités à verser en cas d'accident dans les installations nucléaires produisant de l'énergie électrique, que cela n'était possible sur la base de l'expérience existante en matière d'exploitation de réacteurs. Les réacteurs expérimentaux comme celui de Idaho Falls SL-1, qui a explosé le 3 janvier 1961 en provoquant la mort de trois opérateurs, et le réacteur de Windscale, Angleterre, produisant du plutonium, qui a pris feu le 10 octobre 1957 en libérant dans l'environnement des dizaines de milliers de curies, ne fournissaient pas les données dont l'Atomic Energy Commission des Etats-Unis ou les compagnies d'électricité souhaitaient disposer pour inciter les compagnies d'assurance à assurer à des conditions et à des taux raisonnables les centrales nucléaires.

Toutefois, la Commission a été déçue du rapport Brookhaven parce que les estimations de risques qu'il contenait étaient considérées comme beaucoup trop "larges". Quant aux compagnies d'assurance, elles ne possédaient pas l'expérience actuarielle nécessaire en ce qui concerne les réacteurs électronucléaires et elles n'avaient pas grande envie d'assurer ce genre d'installations, tandis que le gouvernement des Etats-Unis faisait -de son côté- tout ce qui était en son pouvoir pour stimuler la production d'énergie électronucléaire et il ne tenait pas à ce que les réacteurs végètent et finissent par devenir des pièces de musée. Le rapport Brookhaven de 1957 avait prévu - comme l'indique le Tableau 2 - une responsabilité de "couverture" maximale de dix milliards de dollars. Etant en possession de cette information, le Congrès des Etats-Unis a adopté le Price-Anderson Act qui libère les industries productrices d'énergie électronucléaire de toutes charges en ce qui concerne les actions

en responsabilité au-delà d'une valeur de 560 millions de dollars. Cela signifie qu'aux Etats-Unis, pour un accident majeur, une personne ne peut recouvrer que 3,5 cents sur un dollar de 1981, ou  $\frac{1}{2}$  cent sur un dollar si le coût d'un accident de réacteur de 1000 MWe s'élève à 6,25 fois celui d'un accident de réacteur de 160 MWe. Il vaut la peine de noter que les compagnies d'assurance, dont l'activité principale et la spécialité est l'évaluation de la probabilité et les conséquences d'un accident, craignaient tellement les risques d'un accident nucléaire qu'il a fallu édicter une loi garantissant qu'elles ne seraient tenues que pour une valeur de 100 millions de dollars au maximum et que le contribuable américain supporterait le reste : 460 millions de dollars ! Inutile de dire que le Price-Anderson Act est une source de nombreuses récriminations de la part de beaucoup d'entre nous, aux Etats-Unis. Si l'énergie nucléaire est "sûre" comme cela est proclamé par ses partisans, comment se fait-il que cette branche de production ne puisse devenir complètement indépendante comme les autres industries ? Il est assez mauvais pour nous, contribuables, de devoir avaliser les coûts de la recherche nucléaire, ainsi que la mise en vigueur d'une réglementation, et approuver une publicité tendancieuse (propagande) et d'avoir en plus à supporter des coûts d'assurance de ce genre. Dans ces conditions, pourquoi ne recevrons-nous pas une pleine compensation pour tout dommage que nous pourrions subir lors d'un accident nucléaire majeur ? De toute évidence, il n'est absolument pas justifié de classer les accidents importants de réacteurs dans la même catégorie que les accidents dus à des catastrophes naturelles, pour lesquels les garanties de couverture sont limitées en de nombreux cas. Le rapport Brookhaven (1975) en dit très peu au sujet des probabilités d'accident du type TMI-2; toutefois, il indique une probabilité de  $10^{-3}$  à  $10^{-4}$  pour un accident survenant à la suite de la fusion du cœur d'un réacteur qui libérerait des quantités importantes de produits de fission hors de l'enceinte du réacteur mais pas hors des bâtiments et des enceintes de la centrale. Si cela s'applique aussi parfaitement à

l'accident TMI-2, c'est parce que, à l'époque de l'accident (28 mars 1979), les Etats-Unis avaient tablé sur 300 années-réacteurs et fondaient leurs calculs sur ce seul accident (très mauvaise statistique . . .) par conséquent la probabilité devait nécessairement être de l'ordre de  $1/300$ , soit  $3 \times 10^{-3}$  accidents du type TMI-2 par année-réacteur. La valeur la plus élevée du rapport Rasmussen :  $5 \times 10^{-5}$  accidents de fusion de coeur, par année-réacteur s'écarte de la "réalité" d'un facteur de 60. Ainsi, les sages de Brookhaven ont fait une meilleure prédiction en 1957 que l'équipe Rasmussen en 1975, avec tous leurs ordinateurs et leurs forêts d'"arbres de fautes" et autres, qu'ils se sont ingéniés à utiliser.

Si l'on considère les conséquences de l'accident de Three Mile Island, il est encore trop tôt pour faire une bonne estimation. Je pense qu'à cet égard, la principale difficulté réside dans le fait que les estimations de la Nuclear Regulatory Commission des Etats-Unis et de ses consultants au sujet de la libération d'éléments radioactifs et de la dose de rayonnement à laquelle la population a été exposée (personne/rem) semblent trop faibles et que les évaluations faites par Takeshi (1980) du Nuclear Reactor Laboratory de l'Université de Kyoto, sont probablement plus proches de la réalité. Les valeurs présentées à titre de comparaison dans le Tableau 6 font apparaître la grande disparité qui existe entre les estimations de risques.

TABLEAU 6. Estimation des risques courus par une population en raison de la probabilité ou à la suite d'un accident nucléaire

Types de risques dus à l'accident TMI-2	Estimations faites par / dans	Ordre de grandeur du risque
Probabilité d'accident	Rapport Brookhaven	$10^{-3}$ à $10^{-4}$ par année-réacteur
	Rapport Rasmussen	$5 \times 10^{-6}$ à $5 \times 10^{-5}$ par année-réacteur
Risque réel d'accident	Calcul: 1 accident s/ 300 années-réact.	$3 \times 10^{-3}$ par année-réacteur

Libération de gaz nobles	Personnel et consultants NRC	$1,2 \times 10^7$ Ci
	Seo Takeshi	$4,5 \times 10^7$ Ci
Libération d'iode radioactif	Personnel et consultants NRC	16,7 Ci
	Seo Takeshi	$6,4 \times 10^4$ Ci
Dose totale d'irradiation du corps dans la population	Personnel et consultants NRC	1600 - 5300 pers/rem
	Seo Takeshi	16200 pers/rem
Dose d'irradiation de la thyroïde dans la population	Personnel et consultants NRC	1060 pers/rem
Cancers radioinduits (à l'exclusion de la thyroïde)	Personnel et consultants NCR	0,15 à 2,4 cancers mortels
	Auteur du présent article	15 cancers mortels
Cancers de la thyroïde radioinduits	Personnel et consultants NRC	
Coût d'un accident du type TMI-2	Rapports Brookhaven	1 000 000 000 dollars-1981
	Rapports Rasmussen	150 000 000 dollars-1981
	Auteur du présent article	$10^9$ dollars
Coefficient de cancer létal	Personnel et consultant NRC	$2 \times 10^{-4}$ par pers/rem
	Rapport BEIT-III	$2 \times 10^{-4}$ à $3 \times 10^{-4}$ par pers/rem
	Auteur du présent article	$9 \times 10^{-4}$ par pers/rem
	Gofman (1981)	$a \times 10^{-3}$ par pers/rem
Radioinduction d'effets génériques	Personnel et consultants NRC	0,06 à 5,44 par pers/rem

En plus des arguments invoqués par Takeshi, il y a de nombreuses raisons de douter de la précision des valeurs relatives à la libération de produits radioactifs et aux risques qui ont été données par la NRC des Etats-Unis et par ses consultants. On sait, par exemple, que 3 moniteurs étaient en panne dans les conduites d'aération pendant la



période initiale de l'accident; tandis que d'autres ne fonctionnaient pas correctement. D'autre part, pour ce qui est de l'exposition de la population, les estimations de dose de l'USNRC ne commencent qu'à partir de 7 heures du matin, le 28 mars 1979, alors que l'accident a débuté, en réalité, à 4 heures du matin et que le débit de dose d'irradiation dû aux radionuclides d'iode et de gaz nobles de courte période de demi-valeur a été des centaines de fois supérieur à celui des éléments à longue période de demi-valeur (c'est ainsi qu'au début de l'accident, l'activité de Xe-138 était égale à plus de 400 fois celle de Xe-133). Si les enquêteurs n'ont pris en considération que les cinq gaz nobles figurant au-dessus de la ligne de séparation du Tableau 7, c'est tout simplement parce que le programme de surveillance de l'environnement ne commençait pas avant 7 ou 8 heures du matin et au bout de 4 heures, les autres isotopes énumérés au Tableau 7(p.26) ne constituaient plus qu'une faible proportion de la dose d'irradiation à laquelle la population avait été exposée. En revanche, pendant la première heure, la contribution de ces éléments radioactifs constituait pratiquement la totalité de la dose émise par le nuage radioactif qui a passé au-dessus de la région, à moins qu'il se soit produit une retenue non signalée dans la libération des éléments radioactifs par le réacteur détérioré. Même à la fin de cette première heure, Xe-138, Kr-87 et Kr-85m contribuaient dans une proportion de 67% à la dose de radioactivité des gaz nobles et au bout de 4 heures, la contribution de Kr-85 et Kr-87 à cette dose était de 28%. Durant cette période, le vent soufflait à une vitesse d'environ 2 miles à l'heure (3,2 km/h) en direction ouest et nord-ouest, c'est-à-dire d'une manière générale dans la direction d'Harrisburg, dont le centre est situé à environ 12 miles (20 km) de la centrale nucléaire, de sorte que la population habitant dans la direction de la grande ville la plus proche doit avoir reçu, pendant la période initiale, une dose considérable de rayonnement gamma émis par des radionuclides Kr-87 et Xe-138 - dose dont il n'a apparemment pas été tenu compte. Selon certains

TABEAU 7. Pourcentages relatifs de Kr et Xe à l'échéance de différents délais (nombres d'heures après l'arrêt du réacteur)

Activité pendant  
la période de  
 $\frac{1}{2}$  valeur des ra-  
dioéléments

%	Pourcentages d'activité de Kr et Xe à différents moments							
	0h	1h	4h	8h	32h	40h	30d	1y
Xe-133 5.65d 6.62%	0.186	0.957	3.35	6.69	39.97	53.5	98.5	-
Xe-133m 2.2d 0.166%	-	-	-	0.40	1.93	2.48	0.02	-
Xe-135 9.1h 6.3%	2.65	12.65	35.72	53.88	57.9	43.9	-	-
Xe-135m 15m 0.1%	1.53	0.48	-	-	-	-	-	-
Kr-88 2.8h 3.57%	4.87	19.60	33.1	25.19	-	-	-	-
Xe-131m 11.9d 0.025%	-	-	-	-	-	0.11	1.22	-
Kr-85 <sup>(1)</sup> 10.7y 0.293%	-	-	-	-	-	-	0.25	100
Kr-85m 4.5h 1.0%	0.73	3.75	8.38	9.29	0.50	-	-	-
Kr-87 1.3h 3%	8.83	26.7	19.2	4.54	-	-	-	-
Xe-138 17m 6%	81.1	36.1	-	-	-	-	-	-

rapports, la population aurait été exposée principalement au rayonnement de Xe-133. Toutefois, cela ne serait vrai que si la majeure partie de la dose avait été libérée 40 heures ou plus après 4 heures du matin (28 mars 1979). Bien entendu, au bout de quelques mois, la majeure partie de la dose

provenant de l'ensemble des gaz nobles libérés était due au Kr-85. Heureusement qu'à l'époque de l'accident, TMI-2 ne fonctionnait qu'à une puissance de quelques GWe/mois, de telle sorte que la quantité de Kr-85 emmagasinée était très loin de la limite de saturation. Les isotopes d'iode à courte période d'activité présentent un problème semblable à celui des gaz nobles. Ici encore, la question essentielle est la durée de retenue de la radioactivité qui a pu être assurée par le système des filtres à charbon endommagés par l'humidité ou autrement. Les rapports des consultants de la NRC indiquent que la majeure partie des isotopes d'iode libérés à la suite de l'accident TMI-2 consistait en I-131. Si les filtres endommagés n'avaient plus une capacité de rétention significative, l'activité de I-133 (20,8 h., *champ* 6,9) serait plus forte que celle de I-131 (8d, *champ* 3,07) et pendant les quelques premières heures l'activité de I-132 et de I-133 plus celle de I-135, aurait atteint une valeur bien supérieure à celle de I-131. Des isotopes de gaz nobles et d'iode ont pu s'échapper du réacteur TMI-2 par bien des issues, alors que, selon les rapports officiels, aucune fuite importante ne s'est produite, en dehors des conduites d'aération de l'installation. Le rapport USNRC (1980) a conclu : "qu'aucune relation ne peut être établie entre le fonctionnement de TMI ou la libération accidentelle de radioactivité et les répercussions sur la santé dont il a été fait état", en dépit du fait que sur 96 fermes abritant entre 9 000 et 10 000 têtes de bétail, onze d'entre elles ont signalé des symptômes caractéristiques de maladies dues au rayonnement ionisant. Des études récentes (Field, Field, Zegers et Steucek, 1981) m'ont toutefois conduit à mettre en doute les conclusions de l'USNRC et ses évaluations en ce qui concerne la libération de radioactivité qui ne dépasserait pas le niveau de 16,7 Ci pour I-131. Ce groupe d'enquêteurs a mesuré la concentration de I-131 dans la thyroïde de campagnols capturés sur trois emplacements

voisins de TMI-2 entre le 6 et le 16 avril 1979 (c'est-à-dire de 9 à 19 jours après l'accident) et ils ont trouvé de l'I-131 dans la thyroïde de tous ces animaux, lesquels conviennent particulièrement bien comme "instruments" d'observation, parce que leur territoire est extrêmement limité (moins de 0,66 Ha) et ils consomment chaque jour une quantité de végétaux dont le volume équivaut à 1/3 du poids de leur corps. C'est ainsi que les enquêteurs ont trouvé que la concentration moyenne d'I-131 dans la thyroïde des campagnols capturés sur le site III (à 1,9 km de TMI-2) était égale à 1860 pCi/g. A supposer qu'une personne présente cette concentration de I-131, j'estime que la dose reçue serait de  $4,3 \times 10^{-3}$  Q = 8 rem/y. Evidemment, I-129 ( $1,7 \times 10^7$  y) représentait une faible concentration dans les éléments de combustible fondu, en raison de la courte durée d'exploitation du réacteur. Compte tenu du fait que tant d'instruments de détection du rayonnement aient été paralysés par la très forte intensité de la radioactivité, tandis que d'autres fonctionnaient d'une manière erratique, on ne peut accepter l'affirmation selon laquelle il n'a existé que des quantités insignifiantes d'aérosols libérées dans l'atmosphère au cours des 3 premières heures qui se sont écoulées après le début de l'accident. Les fonctionnaires fédéraux et d'Etat reconnaissent eux-mêmes qu'ils n'ont pu mesurer exactement la quantité de matière radioactive qui s'est échappée dans le milieu ambiant et qu'un certain nombre de questions restent encore sans réponse au sujet des fuites, de telle sorte qu'il y a fort peu de chance que nous puissions jamais savoir tout ce qui s'est passé pendant les trois premières heures très critiques et hectiques de l'accident. Il est possible que si, dans 20 ou 30 ans, on observe un plus grand nombre de cancers que celui attendu parmi la population exposée, nous aurons une meilleure réponse à un certain nombre de questions que nous nous posons. Il est malheureux que les premières mesures de l'air ambiant n'aient pas été faites au moins pendant la première heure de l'accident. La surveillance aérienne du

nuage n'a pas commencé avant 4 heures de l'après-midi du 28 mars 1979 (c'est-à-dire 12 heures après le début de l'accident). Si des mesures avaient été faites suffisamment tôt, elles nous auraient indiqué non seulement où le nuage suspect s'est dirigé mais encore sa teneur en isotopes radioactifs et elles nous auraient suggéré une méthode plus fiable pour évaluer la dose d'irradiation de la population. Nous aurions dû tirer profit de la leçon que nous ont donnée les Britanniques, lors de l'accident de Windscale, le 10 octobre 1957. Ils ont en effet jugé extrêmement utiles les renseignements obtenus par des sondages effectués très tôt, au moyen de petits aéronefs. A Three Mile Island, les compteurs TDL de 20 stations d'observation ont fourni une information de base très peu satisfaisante pour évaluer les doses de rayonnement ionisant auxquelles la population a été exposée en raison du passage d'un nuage radioactif. Cela est dû notamment au fait qu'au cours de la première journée, deux de ces stations seulement se sont trouvées - à quelque moment que ce soit - au voisinage de la trajectoire du nuage. Or, c'est précisément ce nuage radioactif, formé très tôt, qui a libéré la plus grande partie de la dose d'irradiation corporelle à laquelle la population a été exposée. D'ailleurs, lorsque deux compteurs TLD se trouvaient à la même station, leurs relevés respectifs différaient souvent d'un facteur de 2 ou plus et, pour une journée donnée, les lectures des compteurs TLD faites à diverses stations, présentaient entre elles des facteurs d'écart de l'ordre de plusieurs centaines. Ainsi, il est très probable que certaines personnes aient reçu des doses de plusieurs centaines de fois supérieures à celles qui ont été enregistrées aux 20 stations en question.

Aucun des compteurs TLD appartenant aux compagnies exploitantes n'ont mesuré la dose de rayonnement beta pendant la période initiale. Les mandataires de la NRC n'ont fait qu'un effort minime pour estimer le rayonnement beta; ils ont plutôt cherché à déterminer les contributions respectives des

éléments suivants : Xe-133 ( $\beta$  0,346), Xe-133m ( $\bar{e}$  0,198, 0,227), Xe-135 ( $\beta$  0,92,  $\bar{e}$  0,214) et I-131 ( $\beta$  0,806, 0,606) et ils ont estimé la dose irradiée en profondeur à 70  $\mu$ m de la surface de la peau. Ils auraient dû prendre en considération le rayonnement bêta à plus haute énergie, notamment celui des radionuclides de gaz nobles et d'iode, par exemple Kr-85m ( $\beta$  0,82), Kr-87 ( $\beta$  2,8), Xe-138 ( $\beta$  2,4), I-133 ( $\beta$  2,12) et I-133 ( $\beta$  1,27). Ils auraient aussi dû tenir compte des doses induites à de moins grandes profondeurs où se trouve une grande partie de la mélanine de la peau, parce que le mélanome malin - contrairement au carcinome des cellules de base et des cellules de la peau - est le type de cancer de la peau radioinduit qui réagit le moins favorablement au traitement médical et parce qu'il est très souvent fatal. D'autre part, le rayonnement beta du Xe-138 - qui représentait la contribution la plus importante à la radioactivité de l'ensemble des gaz nobles pendant la période préliminaire - a, par exemple, un pouvoir de pénétration de l'ordre de 1 cm dans les tissus mous du corps et d'environ 10 m dans l'air. Ainsi, ce rayonnement est à l'origine d'une radioinduction non seulement dans la mélanine de la peau mais également dans le cristallin de l'oeil, dans certains ganglions lymphatiques et dans les gonades mâles. Des cataractes et des tumeurs des ganglions lymphatiques, de même que des mutations génétiques peuvent donc être imputables à ce type de rayonnement.

Si la General Public Utilities Corporation réussit à obtenir l'indemnité de 4 milliards de dollars qu'elle réclame à l'USNRC, les estimations du rapport Rasmussen relatives au coût d'un accident nucléaire du type TMI-2 s'écartent de ce chiffre d'un facteur de 25 pour ce seul compte. Une plainte collective de lésés, déposée au titre du Price-Anderson Act est déjà en voie de règlement pour un montant de 25 millions de dollars et, avec le temps, il faut s'attendre à ce que les demandes individuelles d'indemnisation fassent monter la "facture" à plusieurs milliards de dollars. Bien que l'accident TMI-2 ait été beaucoup moins grave, par son degré

d'importance en ce qui concerne les lésions corporelles et les décès que ne le prévoyait le rapport Brookhaven (1957) pour les accidents de lère grandeur, (c'est-à-dire qu'on n'a enregistré aucun décès alors que, selon l'hypothèse de ce rapport, on aurait pu en déplorer 3400 ), le coût final de cet accident pourrait bien s'établir aux environs de 10 milliards de dollars, comme cela est indiqué au Tableau 2. Il est également probable qu'une grande partie du coût d'un accident nucléaire restera toujours cachée. Il vaut la peine de signaler, à ce propos, que dans la zone de TMI-2, les factures d'électricité ont été majorées de 30% et on rapporte que la société Metropolitan Edison Co a demandé un rattrapage tarifaire de 76,5 millions de dollars et, à cet effet, elle a proposé qu'on facture chaque mois 10 cents à chaque consommateur d'énergie électronucléaire, sur l'ensemble du territoire des Etats-Unis, pour aider à couvrir les frais de l'accident.

#### Risques à long terme d'un accident nucléaire

Comme on l'a indiqué plus haut, tout accident survenant dans une centrale électronucléaire peut avoir des conséquences à court et à long terme en ce qui concerne les dommages, qu'il s'agisse de lésions corporelles ou de décès. Le rapport initial Rasmussen (1975) n'a pas accordé une attention suffisante aux effets à long terme des doses de rayonnement ionisant induites dans l'organisme humain et tout particulièrement à la contribution du Cs-137. De ce fait, la dose d'irradiation à laquelle la population est exposée a été sous-estimée d'un facteur de 25, comme l'a fait remarquer l'Américan Physical Society, en 1975, dans son étude sur la sécurité des réacteurs à eau légère : "LWR Safety Study". Cette correction a été heureusement apportée dans le rapport final Rasmussen. En raison de l'éloignement relatif de la plupart des centrales nucléaires, je pense que le nombre des lésions corporelles et des décès dus à des accidents

graves sera plus important en raison des effets à long terme qu'en raison des effets à court terme.

Le Tableau 8, extrait du rapport Rasmussen (1975), concerne l'Importance relative des divers éléments radioactifs et de leurs effets sur la santé de l'homme en cas d'accident dans une centrale nucléaire.

Il énumère (dans la première colonne) les éléments radioactifs considérés comme les plus préoccupants, en raison de leurs effets à court terme (immédiats - 2ème colonne) et de leurs effets à long terme (tardifs - 3ème colonne).

TABLE 8. Relative Importance of Various Radionuclides for Health Effects Following A Nuclear Power Plant Accident

Radio-nuclide	Early Effects							Late Effects						
	Inhalation							Inhalation						
	CD	GD	BM	L	GI	Th	T	GD	BM	L	MB	O	T	Σ
Te-122	1	2	2	2	2	1	2	-	2	2	2	2	2	22
Cs-134	-	-	2	1	-	-	2	2	2	1	2	2	2	16
I-131	1	2	1	1	-	2	1	-	1	1	1	1	1	13
I-133	2	2	1	1	1	1	1	-	1	1	-	1	1	13
I-135	2	2	1	1	1	1	1	-	1	1	-	1	1	13
I-132	2	2	1	1	-	-	1	-	1	1	-	1	1	11
Ba-140	-	1	2	-	2	-	1	-	2	-	1	1	1	11
Cs-137	-	-	1	-	-	-	1	2	1	-	1	2	2	10
Sr-89	-	-	2	-	1	-	1	-	2	-	2	1	1	10

2-Substantial contribution to dose

1-Small but important contribution to dose

CD-Cloud Dose

L-Lung Dose

MB-Mneod Bone Dose

GD-Ground Dose

Gd-GIT Dose

O-Other Dose

BM-Bone Marrow Dose

Th-Thyroid Dose

T-Testes Dose

#### Légende :

2 - Contribution substantielle à la dose

1 - Contribution faible mais importante

CD - Dose-nuage

L - Dose-poumon

MB - Dose-Os

GD - Dose-sol

Gd - Dose-Tractus gas-

O - Autre dose

BM - Dose-moëlle osseuse

tro-intestinal

T - Dose-Essais

Th - Dose-Thyroïde

Je pense qu'il faut donner aux isotopes I-131 et Cs-137 des facteurs de pondération beaucoup plus importants que 2, de telle manière qu'ils viennent en premier lieu dans



l'énumération. Il faut aussi considérer que, selon le déroulement des accidents, des quantités relativement importantes d'éléments radioactifs actiniques s'échappent dans le milieu environnant et risquent de causer à ce milieu une contamination très grave pouvant durer plusieurs siècles. De nombreuses études ont montré que, lorsque ces éléments contaminent l'environnement, certains agents naturels ou artificiels placés dans le sol augmentent de plusieurs ordres de grandeur le taux d'absorption desdits éléments par les racines des végétaux. Même l'utilisation de chlore dans l'eau des réservoirs des villes peut augmenter de deux à trois ordres de grandeur l'absorption par l'homme de ces isotopes radioactifs. En revanche, les méthodes de culture normales ne peuvent pas modifier sensiblement la répartition de ces éléments dans le sol et, par conséquent, elles n'auront qu'une influence minime sur l'absorption par les végétaux destinés à la consommation humaine. D'autre part, il se pose également à cet égard un problème mondial d'ordre génétique et somatique dû à la libération de C-14 et de H-3 dans l'environnement. Les études du groupe d'Heidelberg (1978) ont montré que l'USRNC et ses consultants, les auteurs des rapports de Brookhaven et Rasmussen, ainsi que les spécialistes chargés de préparer des estimations de risques destinées à documenter les entreprises de services publics et à illustrer les déclarations relatives à l'influence de leurs activités sur l'environnement, ont -en de nombreuses occasions- utilisé des valeurs trop basses et trop peu réalistes pour établir des facteurs qui entrent dans le calcul des doses d'irradiations auxquelles l'homme est exposé, compte tenu notamment des transferts entre le sol et les végétaux, entre le fourrage et les produits animaux, entre le tractus gastro-intestinal et le sang, entre le sang et les divers organes du corps et également en ce qui concerne la durée de la période de demi-valeur des éléments radioactifs séjournant dans ces organes. En certaines circonstances, de sérieux problèmes de caractère très particulier peuvent se poser,

notamment au sujet des éléments Co-58 et Co-60 liés à la vitamine B-12 ou les radioisotopes d'iode qui risquent d'endommager la glande thyroïde du fœtus, pendant les premières phases de son développement. Dans tous les cas de libération de quantités importantes d'iode radioactif, on enregistrera des nodules thyroïdiens (comme cela est indiqué au Tableau 3), un grand nombre de cas de maladies thyroïdiennes pouvant avoir de graves répercussions et également de nombreux cas de cancer de la thyroïde. Parmi les survivants ayant subi des irradiations à haute dose lors d'un accident important survenu dans une installation de production d'énergie nucléaire se trouvant dans les environs, on observera des cas d'opacité du cristallin (dont certains pourront évoluer en cataractes), des aberrations chromosomiques dans les lymphocytes périphériques du sang, des troubles de la croissance, des microcéphalies, des retards du développement mental et une augmentation du cancer sous toutes ses formes, à l'exception possible de la leucémie lymphatique chronique. Beaucoup de cancers seront bénins et, pour la moitié d'entre eux, le traitement médical sera couronné de succès, mais tous les cas coûteront chers, en factures de médecin, en souffrances et en procès. La période la plus critique en ce qui concerne le risque d'induction d'anomalies maximales à la suite d'une irradiation du fœtus, la période la plus dangereuse se situe entre le 20ème et le 25ème jours de la gestation. Malheureusement, certaines femmes peuvent ne pas se rendre compte qu'elles sont enceintes pendant la période de radiosensibilité maximale. A l'époque, un certain nombre de gens ont critiqué le gouverneur de la Pennsylvanie pour avoir demandé l'évacuation des femmes enceintes vivant au voisinage de la centrale nucléaire, lors de l'accident TMI-2. Pour ma part, j'estime que cette mesure était très sage et, après les nombreux cas coûteux qui ont été jugés par les tribunaux, je soupçonne ces mêmes critiques de vouloir écorcher le gouverneur pour n'avoir pas demandé l'évacuation dès 16 heures, le 28 mars 1979.

Un type de dommage, rarement pris en considération, est de nature psychologique; il peut s'agir d'anxiété, de stress, de dépression nerveuse et de suicide. Une étude, d'une valeur de 375 000 dollars, sur le stress des femmes enceintes pendant l'accident TMI-2, a montré que ce type d'affection pouvait revêtir une importance considérable et que désormais les compagnies d'assurance pourraient entendre parler plus souvent de ces mères.

De nombreux rapports traitent de la question générale des risques liés aux accidents survenant dans des centrales nucléaires. L'un de ces rapports, que j'ai trouvé très intéressant et d'une valeur incontestable, a été préparé par Beyea en 1979, dans le cadre du Programme organisé à l'Université de Princeton sur les solutions de rechange en matière de politique nucléaire (Program on Nuclear Policy Alternatives). Ce rapport examine l'accident TMI-2 au cours duquel des rejets de radioactivité d'importances diverses ont été admis par hypothèses, comme cela est indiqué au Tableau 9 (p.36). Ce rapport est d'un grand intérêt parce qu'il indique ce à quoi nous devrions nous attendre en ce qui concerne les répercussions à long terme d'un accident du type TMI-2, par rapport aux divers degrés de rigueur dans les précautions à prendre. Le risque le plus important est presque entièrement lié à d'importants rejets de césium radioactif.

#### Conséquences génétiques d'un accident de centrale nucléaire

L'évaluation des dommages génétiques résultant d'un accident survenant dans la production d'énergie d'origine nucléaire a été pratiquement négligée dans les divers rapports d'accidents et, pour ma part, j'ai fort peu de chose à dire ici sur ce sujet, parce que je voudrais que d'autres réalisent à quel point nous sommes mal informés, du point de vue quantitatif, sur les risques génétiques pouvant résulter de l'exposition d'une population humaine au rayonnement ionisant. Au Tableau 9, note b), on voit que, selon

**TABLEAU 9.** Quelques conséquences à long terme d'accidents hypothétiques à Three Mile Island<sup>a)</sup>

(A l'exclusion de cas de maladie ou de décès immédiats pouvant être associés à l'irradiation à hautes doses de la population qui n'a pas été évacuée à quelques dizaines de miles du réacteur)

Désignation de l'accident	Rejets dans l'atmosphère	Nombre de décès par cancer: b,c, <u>supérieur</u> <u>inférieur</u>	Nombre de cas de nodule thyroïdien c,e <u>supérieur</u> <u>inférieur</u>	Conséquences Restrictions temporaires dans l'agri- culture	Zone nécessitant une décontamination ou des restrictions de longue durée
TMI-0	10% de gaz nobles (comme dans l'accident qui s'est produit)	$\frac{0}{4}$	-	0	0
REJETS PLUS IMPORTANTS QUE CEUX QUI SE SONT PRODUITS REELLEMENT					
TMI-1	60% de gaz nobles	$\frac{1}{25}$		0	0
TMI-2	5% d'iode et 60% de gaz nobles	$\frac{3}{350}$	$\frac{200}{27,000}$	25,000 mi <sup>2</sup> g)	0
TMI-3a	TMI-2 plus 10% de Ce	$\frac{15}{2000}$	$\frac{200}{27,000}$	25,000 mi <sup>2</sup> g)	75 mi <sup>2</sup>
TMI-4a	50% de Ce	$\frac{100}{12,000}$		3,700 mi <sup>2</sup> h)	650 mi <sup>2</sup>
TMI-5a	avec rejets "PWR2"	$\frac{200}{23,000}$	$\frac{3,500}{450,000}$	175,000 mi <sup>2</sup> g)	1400 mi <sup>2</sup>
CONSEQUENCES EN ADMETTANT QUE LE COEUR DU REACTEUR A FONCTIONNE PENDANT BEAUCOUP PLUS LONGTEMPS QUE TROIS MOIS ( COEUR "MUR" )					
TMI-3b	TMI-2 plus 10% de Ce	$\frac{65}{8500}$	$\frac{200}{27,000}$	25,000 mi <sup>2</sup> g)	550 mi <sup>2</sup>
TMI-4b	50% de Ce <sup>k)</sup>	$\frac{440}{48,000}$		18,000 mi <sup>2</sup> h)	4300 mi <sup>2</sup>
TMI-5b	Rejets "PWR2" <sup>i)</sup>	$\frac{550}{60,000}$	$\frac{3,500}{450,000}$	175,000 mi <sup>2</sup> g)	5300 mi <sup>2</sup>

Notes

- a) Tous les accidents sont censés survenir dans des conditions météorologiques typiques. Les dérives d'orientation du vent et les modifications du temps ne sont pas prises en considération.

- b) Total cumulatif pendant une période de 75 ans après l'accident. La gamme des dommages génétiques serait très approximativement identique à celle des décès par cancer tardif.
- c) Le nombre "inférieur" correspond à la direction du vent la plus favorable (Est-Maryland), en admettant le coefficient le plus optimiste en ce qui concerne la relation dose-effet sur la santé et une évacuation à une distance de 50 miles (80 km). Sans évacuation, le nombre "inférieur" serait de 2 à 5 fois plus élevé, selon l'accident.  
Le nombre "supérieur" correspond à la direction du vent la moins favorable (New York/Boston) et en admettant le coefficient le plus pessimiste en ce qui concerne la relation dose/effet sur la santé (on tient également compte d'une évacuation à 50 miles (80 km) mais celle-ci a une faible influence sur les résultats élevés.)
- d) En réduisant la valeur supérieure d'un facteur d'environ 4, on obtient une prévision correspondant à celle résultant de l'utilisation du modèle d'étude Rasmussen. En la multipliant par 4, on obtient une prévision correspondant à celle résultant de l'utilisation des coefficients d'effet sur la santé basés sur les données de Manusco, Stewart et Kneale.
- e) Total cumulatif pendant une période de 25 ans après l'accident. Un espace blanc correspond à un nombre insignifiant.
- f) Renseignements contenus dans le rapport de référence Beyea (1979).
- g) Restrictions sur le lait (Beyea 1979)
- h) Restrictions sur les récoltes pendant la première année. (Aliments récoltés impropres à la consommation pour les enfants).
- i) Un accident "PWR2" selon la définition donnée dans l'étude Rasmussen (1975). Fusion du coeur du réacteur avec rupture de l'enceinte due à une surcharge de pression.
- j) Ce nombre pourrait être réduit de moitié si des efforts de décontamination ou de transfert en masse étaient entrepris dans les zones urbaines, pour éviter les irradiations à faible dose.
- k) Seuls les rejets de Cs sont envisagés, pour bien montrer que le Cs prédomine dans les conséquences à long terme.

Beyea, les répercussions génétiques seraient approximativement égales au nombre des décès par cancer tardif, après latence. Je réagis vigoureusement contre les déclarations de certains partisans du nucléaire qui laissent entendre que le risque génétique est négligeable, en nous rappelant qu'aucun effet génétique n'a été observé parmi les survivants des bombardements atomiques des villes de Hiroshima et Nagasaki. D'autre part, la population en cause est trop restreinte et le temps qui s'est écoulé depuis ces événements est trop court; d'autre part, on a bien observé certains effets génétiques. La modification de la proportion des sexes s'est produite dans le sens attendu (c'est-à-dire : qu'il est né plus de filles que de garçons pour les pères ayant subi des irradiations). Toutefois, les résultats recueillis jusqu'ici (1974) ne sont pas significatifs du point de vue statistique. L'étude Neel-Kato-Schull (1974) traite des maladies génétiques dominantes parmi les survivants japonais; maladies pouvant être une cause de décès prématuré chez les enfants et les jeunes gens, avant l'âge de 17 ans. Les auteurs ont constaté une élévation très significative de ces maladies parmi les enfants dont les parents ont reçu des doses d'irradiation. Plusieurs études faites sur des animaux ont montré une augmentation des aberrations chromosomiques dans lesquelles les deux chromosomes "ré-assemblés" ne présentent pas le contenu normal de gènes. Ce phénomène peut causer des mutations entraînant des dommages génétiques égaux ou supérieurs à ceux produits par la mutation d'un seul gène. Le syndrome de Down résultant de la présence d'un chromosome 21 supplémentaire représentatif a été rapportée dans certaines études de populations humaines et sa corrélation avec une exposition au rayonnement ionisant a été mise en évidence. Si nous sommes soucieux de maintenir la qualité de la race humaine, nous devrions être plus préoccupés par les mutations non apparentes. Il s'agit de mutations qui ne peuvent pas être facilement décelées dans des études sur des animaux mais qui

intéressent les facultés supérieures de l'homme : son originalité, son tempérament et sa résistance, sa vigueur mentale, etc. C'est ce type de dommage par irradiation qui a le plus particulièrement préoccupé le grand généticien Muller (1964). Il est possible qu'à l'heure actuelle il n'existe pas de meilleure source d'information que le rapport BEIR-III (1980) pour évaluer le risque génétique découlant de l'exposition à des radiations ionisantes. Pour plus de détails, le lecteur peut se référer également aux rapports BEIR-I (1972) et UNSCEAR (1972). Beaucoup de nos maladies ordinaires découlent de notre héritage génétique, de sorte que toute exposition à des rayonnements ionisants constitue une contribution potentielle à d'éventuelles mutations - dominantes ou récessives - venant alourdir considérablement l'héritage génétique de nos *enfants* et des générations futures. Certaines valeurs de risque génétique présentées dans les rapports cités plus haut ont été réduites dans des proportions de l'ordre de 10, pour permettre aux intéressés de tirer parti d'estimations de risque inférieures, correspondant à de faibles doses et à de bas débits d'irradiation. Toutefois, il convient d'utiliser avec prudence ces valeurs réduites parce que - comme le suggèrent certains travaux (Lyon 1972) - ces réductions de risque ne sont pas garanties et elles ne seraient assurément pas applicables en cas de forte irradiation et de débit de dose élevé. Le rapport BEIR-III adopte assez arbitrairement un coefficient global de risque génétique correspondant à 0,004 à 0,02 mutation génétique par rem ou une dose de doublement de 50 à 250 rems. Or, si l'on appliquait ces valeurs à la dose d'irradiation totale du corps, pour la population exposée à l'accident TMI-2, cela correspondrait à : (1600 à 16 200) x (0,004 à 0,02), c'est-à-dire 6,4 à 324 mutations génétiques induites dans la population par cet accident. Le Tableau 3 extrait du rapport Rasmussen indique que la probabilité d'accident de centrale nucléaire causant 100 effets génétiques n'est que de  $1,5 \times 10^{-8}$  par réacteur-année et qu'un accident causant 10 déficiences

génétiques a une probabilité d'occurrence de  $3,5 \times 10^{-6}$ , de sorte qu'ici encore le rapport Rasmussen ne semble pas trouver sa confirmation, même dans un intervalle de plusieurs ordres de grandeur.

L'étude des risques génétiques revêt une importance particulière, si l'on veut tenir compte des dommages génétiques qui seraient causés à la population du monde en cas d'incorporation de H-3, C-14 et P-32 au DNA des cellules de l'embryon humain. Ici, la transmutation en d'autres éléments dans le noyau même de la cellule (c'est-à-dire H-3 en He-3, C-14 en N-14 et P-32 en S-32), de même que toute l'ionisation locale contribuent au dommage génétique.

#### Les risques de radioinduction du cancer

Par la force des choses, durant toute la période initiale, la plupart des études sur les effets des irradiations à bas niveau ont été faites sur des animaux d'élevage plutôt que sur l'homme. Ces études ont, en de nombreux cas, grossièrement sous-estimé le risque de cancer chez l'homme, en raison de sa plus grande radiosensibilité, du fait que l'homme est un animal hétérogène et aussi parce que de nombreux types de cancers ont de longues périodes d'incubation, dépassant souvent la longévité même de la plupart des animaux d'expérimentation. L'incidence du cancer se rapporte évidemment à la période qui s'est écoulée depuis une exposition donnée et non à une partie de la durée de vie. La plupart des études faites sur l'homme couvrent des périodes inférieures à 10 ou 20 ans, de telle sorte que les cancers qui vont se manifester après l'achèvement d'une étude ne peuvent qu'aggraver l'estimation des risques. Actuellement, il n'a été possible d'entreprendre qu'un nombre limité d'études épidémiologiques sur l'exposition de l'homme à de bas niveaux d'irradiation : études de Stewart et Kneale sur l'exposition de l'utérus aux rayons-X, (Oxford 1970); études de Modan Baidatz,



Mart, Steinitz et Levin (1974) sur des personnes dont le cuir chevelu avait été exposé aux rayons-X lors de traitements contre la teigne annulaire ou l'herpès tonsurant; études sur l'irradiation de travailleurs de Hanford par Manusco, Stewart et Kneale (1977), etc. Toutes ces études ont révélé un risque de cancer 10 à 50 fois supérieur au niveau suggéré par les nombreuses études faites sur des animaux ou indiqué par les études faites sur les survivants des bombardements atomiques de Hiroshima et Nagasaki ou sur des malades souffrant de spondylarthrite ankylosante traités aux rayons-X.

La folie qui consiste à se fonder sur des expériences animales a été mise en évidence par une étude de Shields Warren et Gates (1971), au cours de laquelle deux groupes de souris de races différentes ont été exposés à des doses de rayons-X identiques. Dans l'un des groupes, les auteurs ont observé une forte incidence de leucémie et un raccourcissement significatif de la durée de vie tandis que, dans l'autre groupe, ils n'ont pu déceler aucun effet.

Malheureusement, les organismes chargés d'élaborer les normes ont accepté deux études faites sur l'homme (survivants des bombardements japonais et malades atteints de spondylarthrite). Ils s'en sont tenus exactement aux résultats obtenus, comme s'il s'agissait d'une vérité absolue, sans tenter de faire une évaluation des estimations de doses, ni d'examiner les importantes erreurs systématiques dont ces études sont entachées. Or, j'estime pour ma part (Morgan 1981) que les doses de rayonnement subies par les survivants japonais étaient au moins le double de celles qui ont été admises dans le rapport BEIR-III (1980). L'estimation du risque de cancer doit donc être augmentée. La plus significative des erreurs systématiques introduites par les autorités chargées d'élaborer des normes et particulièrement par le rapport BEIR-III, ainsi que par le récent rapport de notre General Accounting Office (GAO), en 1981,

découle du fait que, dans ces études, il n'a pas été tenu compte des effets consécutifs aux incendies et aux explosions, ni de la situation traumatique à laquelle les survivants japonais ont été confrontés. Les lésions physiques, accompagnées de douleurs d'angoisse et concomitantes, ont eu pour résultat d'affaiblir le système immunologique (réticulo-endothélial) de telle sorte que les sujets n'ont plus pu réagir contre les ravages de maladies ordinaires et que beaucoup d'entre eux sont morts avant même que le cancer se soit déclaré. Les sujets les plus faibles, pour lesquels la probabilité de cancer était grande ou chez lesquels certains sièges étaient déjà atteints par le cancer, ont été les premiers à mourir de maladies communes. Beaucoup d'entre eux qui ont survécu à ces premières maladies ont succombé par la suite au cancer, la leucémie atteignant un niveau d'incidence maximal pendant la période de 6 à 11 années qui s'est écoulée après l'évènement. Depuis lors, et même maintenant encore, tous les autres types d'affections malignes (à l'exception de la leucémie lymphatique chronique) sont en augmentation. On peut considérer qu'il existe des erreurs systématiques analogues dans le cas des malades atteints de spondylarthrite ankylosante. Il arrive aussi que certaines personnes souffrent d'une maladie douloureuse et grave; au sujet de tels cas, les études de Radford, Doll et Smith (1977) signalent que les patients meurent rapidement de maladies communes pendant la période de latence normale de la plupart des cancers. Kneale et Stewart (1978a, 1978b) ont montré que des personnes présentant un cancer localisé ont une forte propension à mourir ou se trouvent en grave danger de mourir d'infections secondaires ou même d'accident avant que les affections malignes aient été diagnostiquées cliniquement. Il est démontré que cela résulte du fait que l'état pré-cancéreux est associé à un affaiblissement de la capacité immunologique.

Il existe évidemment une méthode permettant de corriger les erreurs systématiques dues à la prise en compte des décès par le feu, les explosions, etc., mais elle n'a pas été appliquée dans le cas d'Hiroshima et Nagasaki. Les modèles de mortalité ont été étudiés pour un certain nombre d'autres villes ayant subi des bombardements de type classique, des incendies, des inondations, des tremblements de terre, etc. En de nombreux cas, la proportion des décès dus à des causes ordinaires, au cours de l'année qui suivait le désastre, était beaucoup plus importante que pendant l'année qui l'avait précédé et dans chacun de ces cas, les taux de décès ont été plus élevés dans les couches les plus faibles de la population. Il est difficile de comprendre pourquoi les organismes nationaux et internationaux chargés d'élaborer des normes se sont appuyés sur des bases périmées pour déprécier et discréditer l'étude Manusco/Hanford (Manusco, 1977) dans laquelle la dosimétrie utilisée était la meilleure, et comment il se fait qu'ils n'ont pas cherché à éliminer les importantes erreurs de dosimétrie des données japonaises (notamment leurs références d'homologation). De plus, même les critiques ont admis l'existence d'un accroissement significatif de deux affections malignes : le cancer du pancréas et le myélome multiple, en relation avec les irradiations subies à Hanford.

Dans le cas simple, le risque de cancer dû à une exposition à faible niveau peut s'exprimer par la relation suivante :  $P(D) = a + bd^k$ , dans laquelle  $P(D)$  est la probabilité de succomber à une affection maligne à la suite de la radioinduction d'une dose  $d$  (rem), tandis que  $a$ ,  $b$  et  $k$  sont des constantes. Lorsque  $k = 1$ , nous avons une hypothèse de linéarité, lorsque  $k$  est plus grand que 1, nous avons une hypothèse de seuil (parce que, à de faibles doses, les colonnes d'erreurs dépassent l'axe des abscisses), et lorsque  $k$  est plus petit que 1, nous avons une hypothèse de superlinéarité : Baum (1978) a été l'un des premiers chercheurs à démontrer que  $k$  plus petit que 1 (c'est-à-dire la superlinéarité) donne la meilleure corrélation en ce qui concerne un certain

nombre d'affections malignes parmi les survivants des bombardements de Hiroshima et Nagasaki (c'est-à-dire  $k = 0,5$  pour toutes les affections malignes à Hiroshima;  $k = 0,8$  pour la leucémie aiguë à Nagasaki,  $k = 0,86$  pour la leucémie à Hiroshima et pour les deux villes combinées;  $k = 0,19$  pour le cancer des poumons,  $k = 0,35$  pour le cancer de l'estomac et  $k = 0,5$  pour le cancer du sein chez la femme. Il convient de noter que de récentes investigations faites depuis lors (Morgan, 1981) montrent que la dose subie par les survivants des bombardements au Japon était inférieure à celle qui avait été admise par Baum et pour les Commissions BEIR-III (1980) et GAO (1981), les valeurs de  $k$  sont inférieures aux valeurs indiquées ci-dessus ou correspondent à la superlinéarité d'une manière plus prononcée. Une série d'articles (Baum, 1973; Parker, Belsky, Yamamoto, Kawamoto et Keehn, 1973; Silverman et Schmitz-Feuerhake, Muschol, Batjer et Schafer, 1978) suggère avec insistance que le risque d'induction du carcinome de la thyroïde, à de faibles doses de rayonnements ionisants est plus sérieux qu'on le supposait il y a une décennie et que  $k < 1$  (ou le risque lui-même) pourrait être représenté de la manière la meilleure par une relation de superlinéarité en fonction de la dose.

Dans leur analyse des données relatives à la spondylarthrite ankylosante, en ce qui concerne l'induction de la leucémie par les rayons-X, la commission GAO (1981) a conclu : "tous les modèles mixtes essayés ont été en meilleur accord que le modèle linéaire et le modèle inhabituel de la racine cubique a donné le meilleur résultat". Etant donné qu'à des doses inférieures à 100 rems, leur "terme cubique" a contribué à moins de 1% du risque de cancer  $P(d)$ , cela signifie qu'à de faibles doses, la meilleure corrélation correspondait à  $k = 0,5$  ou  $P(d) \propto d$ . Le rapport GAO (1981) a conclu que, pour les survivants japonais, "les courbes dose/effet correspondant à des fonctions de racine carrée, et de distribution linéaire, quadratique ou cubique pour de bas

niveaux d'irradiation donnaient toutes des corrélations acceptables pour au moins une série de données" et que "des groupes très sensibles à de faibles doses permettent d'obtenir des courbes dose/effet pour la totalité de la population, faisant apparaître des effets plus importants par rad aux doses faibles qu'aux doses élevées"; il s'agit donc d'une relation de superlinéarité. Le Comité BEIR-III (1980) a déclaré "l'existence de sous-groupes extrêmement sensibles d'une dimension appropriée pourraient fort bien produire une courbe dose/effet faisant apparaître un effet plus important par rad à toutes les doses très faibles plutôt qu'aux doses élevées." En me référant aux études de Bross (1972) et à d'autres auteurs, j'en viens à la conclusion que nous détenons la preuve de l'existence de tels sous-groupes radiosensibles dans une population hétérogène d'être humains et que ces sous-groupes peuvent ne pas être apparents dans les populations homogènes d'animaux d'élevage utilisés habituellement pour déterminer les relations dose/effet et que les résultats de ces études faites sur ces animaux peuvent avoir conduit à des conclusions erronées au sujet de populations humaines.

En examinant les informations relatives aux effets de l'exposition à faible niveau de rayonnement ionisant, de nombreux scientifiques ont conclu que le coefficient de risque de cancer qui est utilisé par les autorités chargées d'établir les normes et dont il a été question dans l'exposé ci-dessus est trop faible. Je suis d'accord avec ces scientifiques, mais compte tenu de la pauvreté des statistiques, des erreurs systématiques et autres dans la dosimétrie - qui n'ont pas été corrigées - je suis incapable pour le moment de me prononcer d'une manière catégorique sur un "chiffre précis". Pour l'instant, je me contente donc d'utiliser la valeur généralement appliquée à une population hétérogène :  $9 \times 10^{-4}$  cancers mortels par homme-rem et deux fois ce nombre pour le risque total de cancer. Gofman (1981) a fait

une excellente analyse du risque de cancer chez l'homme et il parvient à :  $3,8 \times 10^{-3}$  cancers mortels par personne/rem. La valeur donnée dans les études Hanford est légèrement supérieure (  $\sim 7,5 \times 10^{-3}$  cancers mortels par ~~homme~~-rem. Les fonctionnaires gouvernementaux des Etats-Unis ont utilisé l'estimation de risque la plus basse qu'ils ont pu trouver (  $1 \times 10^{-4}$  cancers mortels par ~~homme~~-rem ) immédiatement après l'accident TMI-2, probablement pour minimiser les risques. Si la relation de superlinéarité convient à toutes les doses faibles, le risque pour de petites augmentations de la dose d'exposition de la population pourrait même être supérieur à la valeur Hanford. A moins qu'il incombe à l'homme d'assumer le fardeau de la preuve, pour sa propre sécurité, nous ne pouvons pas nous permettre d'utiliser une valeur inférieure à  $9 \times 10^{-4}$  cancers mortels par ~~homme~~-rem.

#### REFERENCES

- American Physical Soc. (1975). Study group on light water reactor safety. Rev. Modern Phys. 47, Suppl. 1
- Baum, J. W. (1973). Population heterogeneity hypothesis on radiation-induced cancer, Health Physics 25, 97
- BEIR Report (1972). The effects on populations of exposure to low levels of ionizing radiation. National Research Council. Washington, D.C.
- BEIR Report (1980). The effects on populations of exposure to low levels of ionizing radiation. National Research Council. Washington, D.C.
- Bertini, H. W. (1980). Descriptions of selected accidents that have occurred at nuclear reactor facilities. Oak Ridge Nat. Lab. ORNL/NSIC-176
- Beyea, J. (1979). Some long-term consequences of hypothetical major release of radioactivity to the atmosphere from Three Mile Island. Program on Nuclear Policy Alternatives, Princeton Univ., Princeton, NJ
- Brookhaven (1957). Theoretical possibilities and consequences of major accidents in large nuclear power plants. A report prepared by staff members of Brookhaven National Laboratory and its consultants. USAEC-WASH-740
- Bross, I. D. J. (1972). Leukemia from low-level radiation, New England J. Med., 287:107
- Field, R. W. , E. H. Field, D. A. Zegers and G. L. Steucek (1981). Iodine-131 in thyroids of the meadow vole (*Microtus pennsylvanicus*) in the vicinity of TMI nuclear generating plant. Health Phys. 41, 2, 297
- GAO Report to the Congress of the U.S. (1981) Problems in assessing the cancer risks of low-level ionizing radiation exposure. 2
- Gofman, J. W. (1981). Use of Gofman's doubling dose estimating low-level radiation risk and response. Health Phys. 41, 1, 204
- Heidelberg Study (1978). Radiological assessment of the WYHL nuclear power plant. Dept. of Environmental Protection of Univ. of Heidelberg, Germany
- Kneale, G. W. and A. M. Stewart (1978). Precancers and liability to other diseases. Br. J. Cancer
- Kneale, G. W.; A. M. Stewart; and T. F. Mancuso (1978). Reanalysis of data relating to the Hanford Study of the cancer risk of radiation workers, International Atomic Energy Agency Conference, Vienna, Austria
- Lyon, M. F.; D. G. Papworth and R. J. S. Phillips. Dose rate and mutation frequency after irradiation of mouse spermatogonia. Nature New Biol. 238, 101
- Mancuso, T. F.; A. M. Stewart; and G. W. Kneale; (1977) Radiation exposure of Hanford workers dying of cancer and other causes. Health Physics 33, 5, 369
- Modan, B; D. Baidatz; H. Mart; R. Steinitz; and S. G. Levin; (1974) Radiation-induced head and neck tumors. Lancet, 23, 277

- Morgan, K. Z.; W. S. Snyder and M. R. Ford (1964). Relative hazard of the various radioactive materials. *Health Phys.* 10, 151
- Morgan, K. Z. (1981). Radiation dosimetry. *Science* 263, 4508, 604
- Muller, H. J. (1964) Radiation and heredity. *Amer. J. Public Health, Sup.* Vol. 51, 1
- Neel, J. V.; H. Kato and W. L. Sehall (1974). Mortality in the children of atomic bomb survivors and controls. *Genetics* 76, 311
- Parker, L. N.; J. L. Belsky; T. Yamamoto; S. Kawamoto; and R. J. Keehn (1973). Thyroid carcinoma diagnosed between 13 and 26 years after exposure to atomic radiation, ABCC-Tech. Report 5-73
- Pigford, T. H. (1974). Radioactivity in plutonium, americium and curium in nuclear reactor fuel. Univ. California, Berkeley, CA
- Radford, E. P.; R. Doll; and P. G. Smith (1977) Mortality among patients with ankylosing spondylitis not given X-Ray therapy, *New Eng. J. of Med.* 296, 11, 572
- Rasmussen, N. C. (1975). Reactor safety study. An assessment of accidental risks in US commercial nuclear power plants. USAEC-WASH-1400
- Schmitz-Feuerhake; E. Muschol; K. Batjer and R. Schafer (1978). Risk estimation of radiation-induced thyroid cancer in adults. IAEA-SM-224/712
- Silverman, C. and D. A. Hoffman (1975). Thyroid tumor risk from radiation during childhood, *Preventive Medicine* 4, 100
- Stewart, A. M. and G. W. Kneale (1970). Radiation dose effects in relation to obstetric X-Rays and childhood cancers. *Lancet*, 1186
- Takeshi, S. (1980). NRC's gross underestimation of the radioactive releases and population doses during the TMI-2 accident. Kyoto Univ. Nuclear Reactor Laboratory.
- U. S. Nuclear Regulatory Commission (1980). Investigations of reported plant and animal health effects in the Three Mile Island area. USNRC-NUREG-0738 and USEPA-EPA600/4-80-049
- USNSCEAR Report (1972). Ionizing radiation: levels and effects. UN, New York
- Warren, S. and O. Gates (1971) The Inclusion of leukemia and life shortening of mice in continuous low-level external gamma radiation. *Rad. Res.* 47, 480