Importance relative de l'irradiation naturelle dans l'ensemble des expositions humaines*

H. JAMMET**

(Manuscrit reçu le 14 janvier 1985)

RÉSUMÉ

L'étude commence par le rappel des concepts fondamentaux qui permettent d'exprimer quantitativement l'importance des différentes sources pour l'exposition de l'homme en adoptant soit une approche individuelle, soit une approche collective.

Après avoir rapidement indiqué les composantes de l'exposition normale aux sources naturelles, les différentes actions de l'homme qui sont à l'origine d'une exposition supplémentaire sont étudiées :

- celles qui modifient le rapport entre les sources naturelles et l'homme : la nature de l'habitat, la combustion du charbon, l'exploitation de l'énergie géothermique, l'exploitation des phosphates naturels ;
- celles qui créent des sources nouvelles, artificielles : les essais nucléaires dans l'atmosphère, la production d'énergie d'origine nucléaire, l'utilisation médicale des rayonnements et des radionucléides.

Les engagements d'équivalent de dose effectif sont comparés, pour ces diverses sources, avec ceux qu'entraîne inévitablement l'exposition normale continue aux sources naturelles d'exposition.

ABSTRACT

A review is made of the fundamentals allowing to quantitatively express the importance of the various sources of human exposure by an individual or collective approach. Following a summary of the components of normal exposure to natural sources, the various human actions at the origin of enhanced exposure are studied : 1) those modifying the relationship between natural sources and man (dwelling conditions, coal burning, geothermal energy production, exploitation of phosphate rock) ; 2) those creating new artificial sources (nuclear explosions in the atmosphere, nuclear power production, medical use of radiation and radionuclides).

The effective dose equivalent commitments for these sources are compared with those necessarily involved by continuous normal exposure to the natural sources of exposure.

* Communication présentée lors des journées organisées par la Société française de Radioprotection sur " Les données actuelles sur la radioactivité naturelle ", Monaco, 5-7 novembre 1984.

** Commissariat à l'énergie atomique, Institut de protection et de sûreté nucléaire, IPSN/DPr, BP 6, 92260 Fontenay-aux-Roses.

1. CONCEPTS, GRANDEURS ET UNITÉS

Si l'on veut comparer d'une façon convenable, c'est-à-dire non seulement qualitative mais quantitative, l'irradiation naturelle aux autres types d'irradiation, il faut utiliser un dénominateur commun et des unités qui permettent de comparer réellement les sources et les expositions. Le domaine des grandeurs qui servent à quantifier les expositions humaines, de telle sorte que les valeurs retenues soient représentatives des éventuels dommages que les expositions peuvent provoquer, est relativement complexe.

La notion de *dose absorbée* est la plus simple en matière d'effet d'irradiation sur la matière ; elle représente l'échange d'énergie entre le rayonnement et la matière dans un organe ou tissu donné. En général, quand on parle de dose, il s'agit de dose absorbée, qui est une notion quantitative intéressante mais qui, malheureusement, ne permet pas de passer directement à l'appréciation des dommages éventuels. On est obligé, pour cela, de tenir compte de la *qualité* des rayonnements et ceci est particulièrement vrai dans le domaine de l'irradiation naturelle, où l'on rencontre des rayonnements de toute nature, aussi bien électromagnétiques (gamma essentiellement) que particuliers (rayonnements bêta, neutroniques et rayonnements alpha), qui n'ont pas la même efficacité biologique. Pour cette raison, les valeurs de dose absorbée sont pondérées par des facteurs qui tiennent compte de l'efficacité biologique des rayonnements à faible dose ou faible débit de dose ; la grandeur obtenue est *l'équivalent de dose*. Pour les besoins de la radioprotection, les facteurs de pondération sont pris, de manière très sommaire, égaux à 1 pour les rayonnements gamma et bêta, et à 20 pour les rayonnements alpha, et cela quelle que soit leur énergie.

D'autre part, il faut reconnaître que les dommages résultant de l'irradiation du corps humain peuvent être tout à fait différents selon la distribution spatiale de cette irradiation dans le corps et que pour estimer le nombre d'effets sanitaires radioinduits, c'est-à-dire l'induction de cancers et l'induction de maladies héréditaires, la connaissance de cette distribution est essentielle. Par conséquent, on a été amené à effectuer de nouveau une pondération qui permet de ramener une irradiation hétérogène à une irradiation homogène équivalente ; on obtient, ainsi, *l'équivalent de dose effectif ou efficace*. Enfin, il ne faut pas oublier que l'irradiation, en particulier après incorporation radioactive, est souvent étalée dans le temps, et que pour un individu, il convient de tenir compte de ce que l'on appelle *la dose engagée*, c'est-à-dire la dose qui sera délivrée à partir du moment de l'incorporation tout au long de la vie de l'individu.

L'utilisation des concepts énoncés ci-dessus ne permet, cependant, de résoudre les problèmes que sous l'aspect de l'approche individuelle du problème. Si l'on veut avoir une idée de l'impact des expositions humaines, on est obligé de passer à une approche collective et, dans ce cas, on est amené à envisager cette approche collective sous deux aspects différents : d'une part en partant des sources, et d'autre part en considérant les populations exposées. Si l'on part des sources, une notion importante est celle de *l'engagement de dose* qui tient compte, pour une source ou une pratique donnée limitée dans le temps, de toutes les doses engagées au cours de l'avenir. En ce qui concerne les populations, un autre concept,

qui permet de faire des comparaisons grossières entre les expositions, est le concept de *dose collective*. Il est évident que les expositions humaines sont très différentes d'un individu à l'autre, d'une région à l'autre, d'une époque à une autre selon les circonstances ; par conséquent, la distribution statistique de ces doses individuelles est quelque chose de fort complexe. Une des façons de résoudre le problème de comparaison des distributions consiste tout simplement à faire la somme des expositions individuelles ; c'est ce que l'on appelle la dose collective, qui n'est en aucun cas représentative de la distribution statistique des doses individuelles, mais qui représente une donnée moyenne ne donnant aucune information sur les caractéristiques de dispersion de la distribution statistique.

En résumé, si l'on veut faire une comparaison adéquate des diverses expositions humaines, il convient de raisonner en termes *d'engagement d'équivalent de dose effectif collectif*. C'est ce concept fort complexe qui a été adopté par le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR). Les unités correspondantes sont l'homme-sievert ou l'homme-rem pour les expositions collectives. Les unités d'activité telles que le curie ou le becquerel sont peu utilisées dans cet exposé car elles ne sont absolument pas représentatives de l'impact éventuel des expositions, de nombreux facteurs, soit physiques, soit biologiques, intervenant entre les activités et les expositions.

2. EXPOSITION NORMALE AUX SOURCES NATURELLES DE RAYONNEMENTS IONISANTS

Le tableau I, établi à partir des données du rapport UNSCEAR de 1982, présente les valeurs actuellement admises pour l'exposition nor-

TABLEAU I
Exposition normale aux sources naturelles

Dose individuelle moyenne engagée par an (en mSv)	
Exposition externe	
. rayonnement cosmique	0,30
. rayonnement tellurique (γ)	0,35
total partiel	0,65
Exposition interne	
. radon (α)	0,97
. potassium 40 (β γ)	0,18
. uranium et thorium (α)	0,17
. radionucléides cosmogéniques (β γ)	0,05
total partiel	1,35
Total général	2 mSv (ou 200 mrem)

male aux sources naturelles, moyennée sur l'ensemble de l'humanité. La dose individuelle moyenne engagée par an du fait de l'irradiation naturelle est d'environ 2 mSv. On peut remarquer que l'exposition externe représente 1/3 à peu près du total, l'exposition interne comptant pour les 2/3 restants ; l'exposition externe est due pour moitié au rayonnement cosmique, l'autre moitié découlant du rayonnement tellurique venant du sol. En ce qui concerne l'exposition interne, la plus grande contribution est imputable au radon et à ses descendants ; viennent ensuite des contributions équivalentes du potassium 40 d'une part, de l'uranium et du thorium et de leur famille d'autre part, à l'exception bien entendu du radon et de ses descendants. Pour être complet, il faut mentionner les radionucléides cosmogéniques, c'est-à-dire essentiellement le carbone 14 et le tritium induits par les rayonnements cosmiques. Il est clair que la moitié de l'irradiation naturelle moyenne est due au radon et à ses descendants, d'où l'importance de cette contribution.

3. COMPARAISON AVEC LES AUTRES SOURCES D'EXPOSITION

Les données du tableau I sont relatives à l'irradiation moyenne normale, c'est-à-dire en supposant que l'on vive dans des conditions primitives et sauvages, en vivant de la cueillette, de la chasse et de la pêche et en n'ayant aucune autre énergie disponible que celle de ses propres muscles. A partir du moment où l'on utilise la nature, on modifie l'irradiation naturelle et la modification, en général, a pour conséquence d'augmenter cette irradiation, par exemple en raison de l'augmentation du radon à l'intérieur des habitations, ou encore de l'utilisation des énergies disponibles, soit l'énergie due à la combustion du charbon, soit l'énergie géothermique, ou, pour citer un autre exemple, en raison de l'exploitation des phosphates naturels pour l'agriculture. Une autre catégorie d'exposition est celle des irradiations artificielles, c'est-à-dire créées par l'homme, les unes liées à l'énergie atomique militaire, comme les essais nucléaires atmosphériques, les autres liées à l'énergie nucléaire pacifique, comme la production d'énergie d'origine nucléaire et l'utilisation médicale des rayonnements ionisants et des radionucléides.

3.1. Expositions aux sources naturelles modifiées par l'action de l'homme

a) Radon et ses descendants à l'intérieur des habitations

Les principales sources de radon à l'intérieur des habitations proviennent de la désintégration du radium contenu dans les matériaux de construction et dans le sol sur lequel la maison est implantée, ainsi que du radon contenu dans l'eau d'alimentation qui arrive au robinet, et dans le gaz naturel utilisé pour le chauffage et la cuisine ; enfin, la ventilation plus ou moins importante entraîne des modifications de concentrations en radon dans les habitations. En fait, les deux composantes essentielles sont le sol et la ventilation. Le sol, parce qu'en général c'est sur les sols granitiques ou sur des sols primaires à teneur naturelle élevée en sub-

stances radioactives que l'on trouve des concentrations en radon élevées dans les habitations et, d'autre part, la ventilation du fait que les faibles renouvellements d'air permettent au radon de s'accumuler et à ses descendants à vie courte de se mettre à l'équilibre avec lui. Les matériaux de construction les plus couramment utilisés interviennent en général dans une faible mesure ; cependant, les matériaux à teneurs relativement riches en radium peuvent jouer un rôle important. De tels matériaux peuvent être d'origine naturelle, comme le granit, ou d'origine artificielle, comme le phosphogypse. Enfin, le radon venant de l'eau, le radon provenant du gaz naturel sont mentionnés ici mais il faut reconnaître qu'ils interviennent assez peu.

TABLEAU II
Quelques résultats de mesure de radon à l'intérieur des habitations

Activité dans l'air à l'équilibre Bq/m ³		Dose annuelle mSv (mrem)	
France			
· région parisienne	de 3,7 à 30	0,22 - 1,84	(22 - 184)
· Limousin	de 3,7 à 850	0,22 - 52	(22 - 5200)
Royaume-Uni	de 1 à 89	0,06 - 5,4	(6 - 540)
Canada	de 4 à 93	0,25 - 5,7	(25 - 570)
Suède	de 4 à 600 (1000 ?)	0,25 - 37	(25 - 3700)
Etats-Unis			
· Floride (région des phosphates)	de 4 à 520	0,25 - 32	(25 - 3200)
· Colorado	de 19 à 196	1,2 - 12	(120 - 1200)

Le tableau II présente un échantillon des concentrations équivalentes en radon, à l'équilibre avec ses descendants, observées dans les habitations de plusieurs pays ainsi que les équivalents de dose effectifs annuels correspondants. Pour la France, sont indiqués des résultats pour la région parisienne, c'est-à-dire en terrain sédimentaire où l'on obtient des doses comprises entre 0,2 et 2 mSv par an, ainsi que pour le Limousin sur des terrains hercyniens où l'on trouve des valeurs qui vont de 0,2 à 52 mSv. Il est par conséquent clair que l'irradiation naturelle dans l'habitat varie dans des proportions considérables, puisqu'il y a un facteur 250 entre les valeurs extrêmes de l'exemple choisi. Au Royaume-Uni et au Canada, on trouve des valeurs qui sont moins dispersées tandis qu'en Suède, on a mesuré des concentrations très élevées, comme la valeur de 10 000 Bq m⁻³ que j'ai assortie d'un point d'interrogation. En terme d'équivalent de dose effectif annuel, cette valeur correspond à 600 mSv par an, c'est-à-dire 0,6 Sv par an, ce qui représente une dose absorbée α au poumon de 0,25 Gy (5 Sv), ou encore de 25 rad (500 rem) par an. Des concentrations aussi élevées, *a priori* surprenantes, ont bien été constatées et il n'est pas impos-

sible qu'en France on trouve dans certains cas particuliers des concentrations du même ordre de grandeur. Le tableau II montre, enfin, qu'aux Etats-Unis, des concentrations relativement élevées ont également été mesurées au Colorado et dans la région de Floride où l'exploitation des phosphates est pratiquée de manière intensive. Cela montre que les modifications de l'irradiation naturelle dite normale par l'habitat sont considérables et que les fluctuations peuvent être très importantes, puisqu'il existe un facteur 10 000 entre les concentrations extrêmes présentées au tableau II.

b) Exploitation des phosphates

Les minerais de phosphate présentent habituellement des teneurs élevées en uranium 238 et en ses descendants. Cela entraîne une exposition des populations humaines, du fait notamment de l'utilisation des engrais phosphatés et de l'utilisation du phosphogypse comme matériau de construction. Pour une production annuelle estimée à 10^8 tonnes, la dose collective totale serait d'environ $3 \cdot 10^5$ homme-sievert dont la moitié en exposition interne ; l'exposition individuelle moyenne correspondante est de l'ordre de 6 mrem engagés par an, qui seraient répartis sur tout l'avenir, et pas seulement sur la première année, du fait en partie de l'incorporation des produits radioactifs naturels liée à l'utilisation des engrais phosphatés dans la production agricole mondiale.

c) Utilisation de l'énergie géothermique

Dans le cas de l'énergie géothermique, l'exposition interne ici est essentiellement due aux rejets de radon. On admet que la production d'énergie électrique de 1 GW.an par géothermie délivre 6 homme-sievert. Comme la puissance installée dans le monde est très faible, aussi bien la dose individuelle moyenne que la dose collective totale sont négligeables. Par conséquent, l'énergie géothermique, dans l'état actuel des choses, n'entraîne aucun problème mais ceci est simplement dû au fait que le géothermique n'apporte qu'une contribution tout à fait négligeable à l'ensemble de l'énergie disponible pour l'humanité.

d) Combustion du charbon

Dans le cas de l'utilisation du charbon, les résultats sont différents car le charbon est, au contraire très utilisé. L'exposition est essentiellement due à l'uranium, au thorium et à leurs descendants rejetés dans l'atmosphère. Une production d'énergie électrique de 1 GW.an à l'aide d'une centrale au charbon représente environ 2 homme-sievert, et par conséquent une production mondiale de 1 000 GW.an entraîne un équivalent de dose effectif collectif de $0,2 \cdot 10^4$ homme-sievert pour la production d'énergie (tableau III). Il ne faut cependant pas oublier que le charbon est également utilisé en usage domestique et cela de façon beaucoup plus importante à l'échelle mondiale que pour la production d'énergie dans des centrales. L'usage domestique du charbon entraîne une exposition collective évaluée à près de $10 \cdot 10^4$ homme-sievert, ce qui fait qu'au total, on obtient 10^5 homme-sievert, soit une dose individuelle moyenne engagée par année de pratique de 2,5 mrem, dose qui, il faut le préciser, est délivrée

sur tout l'avenir et pas seulement sur la première année. Cette dose engagée représente à peu près la moitié de ce que représente l'exploitation des phosphates.

TABLEAU III
Combustion du charbon

Exposition due à l'uranium, au thorium et à leurs descendants rejetés dans l'atmosphère

1. Production d'énergie		
base	1 GW.an	2 h.Sv
	1000 GW.an	$0,2 \cdot 10^4$ h.Sv
2. Usage domestique		$9,8 \cdot 10^4$ h.Sv
		$1 \cdot 10^5$ h.Sv
soit une dose individuelle moyenne engagée par an de 0,025 mSv (2,5 mrem)		

3.2. Expositions aux sources artificielles de rayonnements ionisants

a) Production d'énergie d'origine nucléaire

En ce qui concerne la production d'énergie d'origine nucléaire, il est évident qu'il faut considérer la totalité du cycle, c'est-à-dire les mines et le traitement du minerai, la transformation et l'enrichissement de l'uranium, la fabrication du combustible, les réacteurs nucléaires et le retraitement du combustible.

TABLEAU IV
Production d'énergie d'origine nucléaire

Ordre de grandeur des engagements d'équivalent de dose collectif (h.Sv par GW(e).an)*					
Temps d'intégration (ans)	10	10^2	10^4	10^6	10^8
Cycle du combustible	3,9	12	72	140	670
Résidus du traitement du minerai**	0,25	2,5	710	3260	3260
Déchets de haute activité	0	0	0	30	30
	4,15	14,5	782	3430	3960

* Population mondiale estimée à 10^{10} à partir de l'an 2000.

** Estimation fondée sur les hypothèses les plus pessimistes.

Le tableau IV présente la distribution dans le temps et l'ordre de grandeur des engagements d'équivalent de dose effectif collectif exprimés

en homme-sievert par GW(e).an. Pour des temps d'intégration inférieurs au siècle ou de l'ordre du siècle, la contribution essentielle est due au cycle du combustible proprement dit, les résidus miniers jouant un rôle mineur. Pour des temps d'intégration beaucoup plus longs que le siècle, les résidus miniers deviennent prépondérants, tandis qu'apparaissent, à un faible niveau, les déchets de haute activité. Même en supposant que ces déchets retournent dans le milieu, c'est-à-dire que tout le confinement disparaisse, on obtient des valeurs vraiment faibles par rapport à l'ensemble des autres. L'augmentation constatée au cours du temps est normale puisque dans l'estimation de l'engagement de dose, on fait la somme de toutes les doses délivrées à l'humanité depuis le début. L'engagement de dose à l'infini est en pratique représenté par la dernière colonne à 10^8 ans. Si l'on faisait des estimations d'engagement de dose que l'on appelle tronqués, c'est-à-dire au bout de 100 ans, de 10 000 ans ou d'un million d'années, on ne prendrait en compte qu'une partie de l'engagement de dose, car certains des produits liés à l'utilisation de l'énergie nucléaire pacifique sont à vie très longue.

b) Essais nucléaires atmosphériques

Les expositions découlant des essais nucléaires atmosphériques peuvent être présentées de deux manières. La figure 1 montre les doses collectives engagées pour chaque période de tirs entre 1945 et 1980

Fig. 1. - Doses collectives engagées pour chaque période de tirs, exprimées en jours d'exposition de l'humanité aux sources naturelles normales.

Fig. 2. - Dose collective moyenne reçue chaque année jusqu'en 1979, exprimée en % de la dose annuelle due aux sources naturelles.

tandis que la figure 2 présente la dose collective moyenne reçue chaque année jusqu'en 1979. Les engagements de dose collective pour chaque année pendant les périodes de tirs (fig. 1) sont exprimés en jours d'exposition aux sources naturelles. Les engagements de dose collective les plus importants correspondent aux essais effectués en 1961 et 1962, années au cours desquelles les Américains et les Russes ont rivalisé pour faire exploser les bombes les plus grosses et les plus nombreuses ; depuis, les engagements de dose collective par année de pratique ont été pratiquement négligeables ; ils correspondent aux tirs français et aux tirs chinois. La figure 2 illustre une deuxième façon de voir le problème, qui consiste à examiner la dose collective moyenne reçue effectivement chaque année. On s'aperçoit ainsi qu'il y a un certain décalage entre la production et l'exposition. Le maximum est obtenu pour l'année 1963 ; il ne correspond qu'à 7 % de la dose due aux sources naturelles. Ensuite, cela a régulièrement décro et cela continue d'ailleurs de décroître. Il faut bien noter que les présentations des figures 1 et 2 sont tout à fait différentes. Si l'on considère les doses engagées sur l'avenir, on a dépassé l'irradiation naturelle, tandis que si l'on considère au contraire les doses annuelles, on se rend compte que même au moment des tirs les plus nombreux et les plus importants, on n'a jamais atteint un dixième de l'irradiation naturelle. La distribution en fonction du temps

de la dose individuelle moyenne due aux essais nucléaires est présentée au tableau V. Pour le quart de siècle passé, c'est-à-dire de 1955 à 1980, la dose effectivement délivrée est de 90 mrem tandis qu'en ce qui concerne l'avenir, la dose à recevoir du fait que les radionucléides produits restent dans l'environnement est de 25 mrem jusqu'à l'an 2000 et de 290 mrem jusqu'en l'an 50 000, date à laquelle toute la dose aura pratiquement été délivrée.

TABLEAU V
Essais nucléaires atmosphériques

Ordre de grandeur des doses individuelles moyennes			
1. Reçues au cours du quart de siècle passé			
0,90 mSv (90 mrem)			
2. A recevoir dans l'avenir			
en l'an	2000	0,25 mSv (25 mrem)	
	2020	0,40 (40 mrem)	
	2050	0,50 (50 mrem)	
	5000	1,50 (150 mrem)	
	12000	2,30 (230 mrem)	
	50000	2,90 (290 mrem)	
	10 ⁵	2,90 (290 mrem)	
	10 ⁶	2,90 (290 mrem)	

c) Utilisation médicale des rayonnements

Les doses individuelles moyennes annuelles dues à l'utilisation médicale des rayonnements, telles qu'elles ont été estimées d'une façon assez grossière par le Comité scientifique des Nations Unies, sont présentées au tableau VI. Pour les pays qui sont médicalement développés, c'est-à-dire essentiellement les pays industrialisés, on trouve une irradiation qui est de l'ordre de 1 mSv par an, soit 100 mrem, en grande partie due à l'exposition externe, puisque c'est de très loin l'utilisation diagnostique des rayonnements qui est importante et non pas la médecine nucléaire. Quand on passe à l'ensemble du monde, où la très grande majorité des populations humaines sont sous-médicalisées, l'irradiation moyenne diminue d'une façon importante et elle est estimée à 0,4 mSv par an ou 40 mrem.

TABLEAU VI
Utilisation médicale des rayonnements

Dose individuelle moyenne annuelle			
1. Dans les pays médicalement développés			
Exposition externe	0,9 mSv	} 1 mSv (100 mrem)	
Exposition interne	0,1 mSv		
(médecine nucléaire)			
2. Pour l'ensemble du monde			
Exposition externe	0,4 mSv	} 0,4 mSv (40 mrem)	
Exposition interne	négligeable		

4. BILAN DES EXPOSITIONS HUMAINES AUX RAYONNEMENTS IONISANTS

TABLEAU VII
Bilan général (passé)

Doses reçues au cours du quart de siècle passé exprimées en jours d'exposition aux sources naturelles		
Sources naturelles	9125	jours
Utilisation médicale	1825	jours
Phosphates et sous-produits	274	jours
Essais nucléaires	164	jours
Combustion du charbon	114	jours
Energie nucléaire	0,75	jour

Le tableau VII présente un bilan général des doses reçues au cours du quart de siècle passé, exprimé en jours d'exposition aux sources naturelles ; l'irradiation naturelle vient en tête avec 9 125 jours d'irradiation naturelle, suivie de l'utilisation médicale avec environ 1 825 jours, l'utilisation des phosphates avec 274 jours, les essais nucléaires avec 164 jours, la combustion du charbon avec 114 jours tandis que la production d'énergie nucléaire au cours du quart de siècle passé correspond à moins d'un jour d'irradiation naturelle. Ce tableau montre bien quel est l'ordre de grandeur des problèmes.

TABLEAU VIII
Bilan général (Avenir)

Engagement de dose exprimé en jours d'exposition aux sources naturelles, en % de l'exposition aux sources naturelles		
	Sources naturelles	Essais nucléaires
18 ans (an 2000)	365×18	46 (0,7 %)
100 ans	$365 \cdot 10^2$	110 (0,3 %)
10^4 ans	$365 \cdot 10^4$	420 (0,01 %)
10^6 ans	$365 \cdot 10^6$	530 ($1,5 \cdot 10^{-4}$ %)
10^8 ans	$365 \cdot 10^8$	530 ($1,5 \cdot 10^{-6}$ %)
10^9 ans	$365 \cdot 10^9$	530 ($1,5 \cdot 10^{-7}$ %)

TABLEAU IX
Bilan général (Avenir)

Engagement de dose exprimé en jours d'exposition aux sources naturelles, en % de l'exposition aux sources naturelles		
	Sources naturelles	Energie nucléaire 200 GW (e)
18 ans (an 2000)	365×18	1 (0,015 %)
100 ans	$365 \cdot 10^2$	9 (0,025 %)
10^4 ans	$365 \cdot 10^4$	124 ($3,4 \cdot 10^{-3}$ %)
10^6 ans	$365 \cdot 10^6$	1100 ($3 \cdot 10^{-4}$ %)
10^8 ans	$365 \cdot 10^8$	1300 ($3,6 \cdot 10^{-6}$ %)
10^9 ans	$365 \cdot 10^9$	1300 ($3,6 \cdot 10^{-7}$ %)

La comparaison avec l'irradiation naturelle des doses reçues dans l'avenir, du fait de l'énergie nucléaire militaire et de l'énergie nucléaire civile, est présentée respectivement dans les tableaux VIII et IX. Si l'on considère l'engagement de dose exprimé en jours d'exposition aux sources naturelles et en pourcentage de l'exposition aux sources naturelles, on peut souligner un fait intéressant qui échappe même aux personnes intéressées. L'irradiation naturelle est pratiquement sans changement au cours du temps, vu la période des substances radioactives impliquées et, par conséquent, la proportion de l'irradiation artificielle à des époques éloignées dans le futur devient de plus en plus faible par rapport à l'irradiation naturelle. En ce qui concerne les essais nucléaires (tableau VIII), cette proportion est de 0,7 % jusqu'à l'an 2000 et seulement de 10^{-7} % au bout d'un milliard d'années. La contribution de l'exposition due aux essais nucléaires est donc de plus en plus faible au fur et à mesure qu'on s'éloigne dans le temps. Par conséquent, l'argument qui consiste à dire que les produits à vie longue irradient les populations perd de sa valeur à l'occasion de la comparaison avec l'irradiation naturelle parce que ces produits à vie longue décroissent alors que l'irradiation naturelle se maintient pratiquement indéfiniment.

Pour la production d'énergie nucléaire civile, de la même façon, l'exposition cumulée croît (tableau IX), mais cette exposition cumulée, lorsqu'elle est comparée à la somme de l'irradiation naturelle correspondante, devient de plus en plus faible pour tomber, elle aussi, de l'ordre du millionième dans un avenir lointain.

5. IMPACT SANITAIRE

Si on veut évaluer l'impact éventuel de ces expositions, c'est-à-dire l'induction d'affections cancéreuses et d'affections génétiques, deux choses importantes doivent être soulignées. La première c'est que l'irradiation naturelle moyenne de 2 mSv par an sur la base d'une induction de cancer mortel de 10^{-4} par rem ou de 10^{-2} par sievert, correspond, pour une irradiation moyenne pendant 50 ans, à la probabilité moyenne pour un homme d'avoir un cancer du fait de l'irradiation naturelle de 1 pour mille. Or, la probabilité totale pour un homme d'avoir un cancer mortel est de plus de 20 %, c'est-à-dire 200 pour mille avec des fluctuations qui vont de 150 à 250 selon le lieu et les conditions de vie. Il est, par conséquent, illusoire d'essayer de déterminer si l'irradiation naturelle moyenne est responsable de l'induction de cancers dans l'humanité puisqu'elle ne correspond qu'à un taux de 1 pour 1000 par rapport à ce taux global de 200 pour 1000.

On peut en déduire également que la détermination de l'impact, sur le plan épidémiologique, des expositions additionnelles, telles que l'augmentation de l'irradiation naturelle et les expositions artificielles, est tout à fait illusoire puisque ces expositions sont plus faibles que l'irradiation naturelle.

Que peut-on faire sur le plan biologique si l'on cherche à observer les effets de l'irradiation sur l'homme ? La seule chose à faire est d'étudier

des cas exceptionnels ou des cas particuliers ; l'épidémiologie intéressante sur le plan de l'induction des cancers est relative à l'irradiation professionnelle, et en particulier à celle des mineurs d'uranium chez qui l'on a observé jusqu'à 50 % d'induction de cancers du poumon. Les travailleurs de l'industrie des peintures luminescentes, à une époque où l'on ne prenait pas de précautions particulières, ont également reçu des doses élevées. D'autres irradiations importantes et souvent abusives ont été délivrées en radiodiagnostic à une époque où l'on faisait subir aux malades tuberculeux deux ou trois examens par semaine pendant des mois ; en conséquence il a été observé chez les femmes des inductions de cancer du sein. Dans le domaine médical encore, des doses très importantes ont été délivrées à des enfants que l'on soignait de la teigne par irradiation de la tête entraînant des cancers de la thyroïde. Sur le plan des irradiations importantes, il faut également citer les irradiations militaires, non pas celles des essais nucléaires mais celles dues à la guerre elle-même, avec les bombes d'Hiroshima et de Nagasaki où, avec des doses de 100, 200 et 300 rem, des effets peuvent être observés avec, cependant, bien des difficultés. Enfin, des irradiations accidentelles localisées de plusieurs centaines ou plusieurs milliers de rads ont également permis d'observer des inductions de cancer.

En résumé, la connaissance de l'exposition due à l'irradiation naturelle offre l'intérêt de fournir une référence pour la comparaison entre les divers types d'expositions. Sur le plan des effets pathologiques des rayonnements, elle permet de montrer que, à moins d'avoir à faire à des cas exceptionnels, on ne peut pas mettre en évidence une corrélation significative entre exposition et effet.