



Nations Unies

Rapport du Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants

Assemblée générale
Documents officiels · Quarante-huitième session
Supplément No 46 (A/48/46)

Rapport du Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants

Assemblée générale
Documents officiels · Quarante-huitième session
Supplément No 46 (A/48/46)



Nations Unies · New York, 1995

NOTE

Les cotes des documents de l'Organisation des Nations Unies se composent de lettres majuscules et de chiffres. La simple mention d'une cote dans un texte signifie qu'il s'agit d'un document de l'Organisation.

TABLE DES MATIÈRES

	<u>Paragraphe</u> s	<u>Page</u>
I. INTRODUCTION	1 - 9	1
II. EFFETS BIOLOGIQUES DES RAYONNEMENTS	10 - 64	3
A. Radiobiologie	17 - 49	4
1. La cible de l'action des rayonnements	17 - 26	4
2. Effets de modifications induites dans le code génétique cellulaire	27 - 49	6
B. Épidémiologie	50 - 64	10
III. ÉVALUATIONS QUANTITATIVES DES EFFETS DES RAYONNEMENTS	65 - 111	15
A. Quantités et unités	65 - 78	15
1. Quantités dosimétriques	66 - 72	15
2. Risque et détriment	73 - 78	16
B. Effets sur l'être humain	79 - 111	17
1. Effets déterministes	82 - 95	18
2. Cancer radio-induit	96 - 107	20
3. Effets héréditaires	108 - 111	22
IV. SOURCES D'EXPOSITION AUX RAYONNEMENTS	112 - 174	24
A. Base de comparaisons	112 - 117	24
B. Niveaux d'exposition	118 - 174	25
1. Expositions aux sources naturelles	118 - 120	25
2. Expositions médicales	121 - 134	26
3. Expositions dues aux explosions nucléaires et à la production d'armes nucléaires	135 - 140	28
4. Expositions dues à la production nucléaire d'électricité	141 - 146	30
5. Expositions dues aux accidents graves	147 - 156	32

TABLE DES MATIÈRES (suite)

	<u>Paragraphes</u>	<u>Page</u>
6. Expositions professionnelles	157 - 169	34
7. Résumé des données disponibles	170 - 174	37
V. LA PERCEPTION DES RISQUES RADIOLOGIQUES	175 - 180	39
VI. BILAN ET PERSPECTIVES	181 - 189	41
A. Niveaux d'exposition	181 - 183	41
B. Effets biologiques	184 - 186	41
C. Perspectives	187 - 189	41

ANNEXES

I. Membres des délégations nationales qui ont assisté aux trente-huitième, trente-neuvième, quarantième, quarante et unième et quarante-deuxième sessions	44
II. Fonctionnaires scientifiques et consultants qui ont collaboré avec le Comité à l'élaboration du présent rapport	46

I. INTRODUCTION

1. Le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants¹ présente à l'Assemblée générale², et par là à la communauté scientifique mondiale, ses évaluations les plus récentes des sources de rayonnements ionisants et des effets de l'exposition à ces sources. Le présent document est le onzième d'une série de rapports établis par le Comité depuis sa création en 1955. Il vise principalement à évaluer les incidences, pour la santé, de toute une gamme de doses de rayonnements ionisants et à estimer la dose à la population mondiale provenant des sources naturelles et artificielles.

2. L'élaboration de ce rapport et de ses annexes scientifiques (voir par. 9)³ a été menée de la trente-huitième à la quarante-deuxième session du Comité. Les sujets traités dans ce rapport ont été discutés aux sessions annuelles du Comité, sur la base de documents de travail établis par le Secrétariat, qui ont été modifiés et amendés d'une session à l'autre pour tenir compte des vues du Comité. Le rapport repose principalement sur des données fournies par les États membres avant la fin de 1989. Des renseignements plus récents ont servi à interpréter ces données.

3. Les fonctions de président, vice-président et rapporteur ont été assurées, respectivement, par : K. Lokan (Australie), J. Maisin (Belgique) et E. Létourneau (Canada) aux trente-huitième et trente-neuvième sessions; J. Maisin (Belgique), E. Létourneau (Canada) et L. Pinillos Ashton (Pérou) aux quarantième et quarante-et-unième sessions; et E. Létourneau (Canada), L. Pinillos Ashton (Pérou) et G. Bengtsson (Suède) à la quarante-deuxième session. On trouvera à l'annexe I du présent rapport la liste des spécialistes qui ont participé à ces sessions du Comité en qualité de représentants officiels ou de membres des délégations nationales.

4. Le Comité, qui par son approbation du présent rapport en assume l'entière responsabilité, tient à remercier de leur concours le petit groupe de consultants, nommés par le Secrétaire général, qui l'ont aidé à établir le texte du rapport et les annexes scientifiques. L'annexe II du présent rapport donne la liste de ces consultants. Ce sont eux qui ont procédé à l'examen et à l'analyse préliminaires des données techniques reçues par le Comité ou extraites de publications scientifiques, qui ont servi de base aux délibérations finales du Comité.

5. Des représentants du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) et de la Commission internationale des unités et mesures radiologiques (CIUR) ont assisté aux sessions du Comité au cours de la période considérée. Le Comité tient à leur exprimer sa reconnaissance pour leur participation aux débats.

6. Dans la partie principale du rapport, le Comité résume les principales conclusions des annexes scientifiques. Ces résultats sont fondés sur les rapports antérieurs du Comité, compte tenu des données scientifiques les plus récentes. Dans le rapport de 1988, le Comité avait fait un exposé détaillé de ses travaux antérieurs, notamment de l'évolution des concepts et des évaluations. Le présent rapport comporte un aperçu général des effets biologiques des rayonnements ionisants, tels qu'on les perçoit à l'heure actuelle (chap. I). Pour quantifier les effets biologiques des rayonnements et

définir les expositions qui les provoquent, il faut bien comprendre les quantités et unités radiologiques (voir chap. II, sect. A).

7. Pour déterminer les conséquences (chap. II, section B), le Comité se fonde à la fois sur les résultats de la recherche radiobiologique et d'études épidémiologiques de populations humaines exposées. Les diverses sources de radioexposition humaine sont exposées succinctement et évaluées au chapitre III. Pour évaluer les doses, il se fonde sur les données publiées dans la documentation pertinente, complétées par des données fournies par de nombreux États Membres de l'ONU. Les lecteurs des rapports du Comité doivent souvent tenir compte de la manière dont les membres du public perçoivent les risques associés aux rayonnements ionisants. Cette perception dépend de divers facteurs individuels et sociaux, ainsi que de leurs interactions. On trouvera au chapitre IV un exposé des principales caractéristiques de la perception des risques radiologiques. Un bref résumé et certaines indications concernant les perspectives figurent au chapitre V.

8. Le Comité est conscient de la grande diversité des lecteurs de son rapport à l'Assemblée générale et des annexes scientifiques. Partout dans le monde, des membres du public et des membres des gouvernements sont préoccupés par les risques radiologiques. Des scientifiques et des spécialistes du monde médical s'intéressent aux données rassemblées dans les rapports du Comité et aux méthodologies adoptées pour les évaluations radiologiques. Dans l'exécution de ses tâches, le Comité fait preuve d'une grande prudence dans l'examen des données qui lui sont soumises; il s'attache à garder une position indépendante et impartiale dans l'élaboration de ses conclusions. Le Comité présente les résultats de ses travaux dans la partie principale du rapport à l'Assemblée, qui est rédigée en termes très généraux. Les annexes scientifiques sont rédigées sous une forme et dans des termes qui s'adressent principalement aux spécialistes.

9. Conformément à l'usage établi, seule la partie principale du rapport est soumise à l'Assemblée générale. Le rapport complet, comprenant les annexes scientifiques, fait l'objet d'une publication des Nations Unies. Cette pratique vise à assurer une plus large diffusion des conclusions du Comité, au bénéfice de la communauté scientifique internationale. Le Comité tient à mentionner, à l'intention de l'Assemblée, que c'est uniquement pour des raisons de commodité que la partie principale du rapport est séparée des annexes scientifiques. Il faut bien comprendre que les données scientifiques contenues dans les annexes ont joué un rôle capital dans la formation des conclusions du Comité.

II. EFFETS BIOLOGIQUES DES RAYONNEMENTS

10. Le processus d'ionisation provoque inévitablement des modifications dans les atomes et les molécules. Dans les cellules, une partie du dommage initial peut avoir des conséquences à court terme ou à long terme. Si un dommage cellulaire survient et n'est pas réparé de manière adéquate, il peut empêcher la cellule de survivre ou de se reproduire, ou bien il peut avoir pour résultat une cellule viable mais modifiée. Ces deux aboutissements ont des conséquences très différentes pour l'organisme dans son ensemble.

11. La fonction de la plupart des organes et tissus du corps n'est pas altérée par la perte d'un petit nombre, ou même parfois d'un grand nombre de cellules; mais si le nombre ou le rôle des cellules perdues est suffisamment important, on pourra observer un dommage qui sera le reflet d'une dysfonction tissulaire. La probabilité d'un tel dommage sera nulle aux faibles doses; mais au-dessus de la dose liminale (le seuil), elle augmentera rapidement jusqu'à l'unité (100 %). Au-dessus du seuil, la gravité du dommage augmentera avec la dose. Ce genre d'effet est appelé "déterministe", parce qu'il est inévitable si la dose est suffisamment forte. Si la perte de cellules peut être compensée par le repeuplement, l'effet aura une durée relativement courte. Si les doses résultent de faits connus, il est possible de préciser les sujets atteints. Certains effets déterministes ont des caractéristiques qui les distinguent d'effets similaires dus à d'autres causes, ce qui permet de repérer les sujets atteints. Parfois, on a détecté des causes en observant des effets déterministes imprévus.

12. Le résultat final est très différent si la cellule irradiée est modifiée, plutôt que détruite. Elle peut alors être en mesure de produire un clone de descendantes modifiées. L'organisme possède plusieurs mécanismes de défense très efficaces, mais il ne serait pas réaliste de penser que ces mécanismes peuvent être entièrement efficaces à tout moment. Ainsi, le clone de cellules résultant de la reproduction d'une cellule somatique modifiée mais viable peut parfois donner lieu, après un délai plus ou moins long appelé la période de latence, à la manifestation d'une condition maligne : un cancer. La probabilité, mais non la gravité, d'un cancer augmente avec la dose. Ce genre d'effet est appelé "stochastique", ce qui signifie "de nature aléatoire ou statistique". Si le dommage survient dans une cellule dont la fonction est de transmettre l'information génétique aux générations ultérieures, tous les effets résultant de ce dommage, qui peuvent être très différents quant à leur nature et leur gravité, se manifestent dans la progéniture de la personne exposée. Ce genre d'effet stochastique est appelé "héréditaire". Même si les doses sont connues, seules les statistiques permettent de repérer l'accroissement des cas de cancers et de troubles héréditaires : il n'est pas possible de repérer les sujets atteints. De plus amples détails sont donnés plus loin.

13. Les expositions aux rayonnements ne sont un souci majeur du Comité que dans la mesure où elles provoquent des modifications dans le spectre des risques auxquels l'humanité est soumise. En conséquence, une tâche essentielle du Comité continue d'être l'analyse et l'interprétation des données disponibles qui permettent d'améliorer la connaissance des relations quantitatives entre l'exposition aux rayonnements et les effets sur la santé. Sauf à la suite d'accidents graves, et dans le cas indésirable mais inévitable d'irradiation de tissus sains en radiothérapie, les doses reçues par les êtres humains ne sont pas suffisamment élevées pour produire des effets déterministes. Bien que le Comité continue de s'intéresser aux effets déterministes (l'une des annexes au présent rapport a trait aux effets déterministes chez les enfants), la plus

grande partie de ses travaux biologiques au cours des dernières années a porté sur les effets stochastiques chez les êtres humains.

14. Les sources les plus pertinentes de données sur les effets biologiques des rayonnements sont celles que l'on obtient directement dans l'étude de groupes de population humaine exposés à diverses quantités connues de rayonnements. L'étude comparative de la pathologie de tels groupes constitue l'épidémiologie. C'est une discipline scientifique qui exige à la fois des connaissances médicales et des connaissances mathématiques. Elle est étudiée plus en détail sous I.B. En outre, de nombreuses données sur les mécanismes de dommage et les relations entre la dose et la probabilité d'effets nocifs chez l'homme peuvent être obtenues par la recherche biologique sur des cellules cultivées in vitro et des animaux. Les études de ce genre permettent d'établir des liens entre le dommage aux cellules et les effets éventuels dans des tissus ou dans l'organisme entier. Il est difficile de faire des prédictions quantitatives des risques pour les humains en se fondant sur des données concernant des espèces autres que l'espèce humaine, mais, en l'absence de données sur les humains, on peut avoir à utiliser directement des données concernant des animaux.

15. Dans l'étude des risques radiologiques, on s'intéresse surtout aux faibles doses et débits de dose auxquels des êtres humains sont exposés dans les travaux sous rayonnements et autres situations de la vie quotidienne. Au contraire, les données épidémiologiques les plus sûres découlent de situations impliquant des doses et débits de dose élevés. Quelques études sur l'exposition à des doses intermédiaires, par exemple les travailleurs sous rayonnements dans l'industrie nucléaire et le radon dans les bâtiments, sont maintenant en cours.

16. Il faut bien admettre que les études épidémiologiques ne reposent pas nécessairement sur une bonne compréhension des mécanismes biologiques du cancer. Cependant, leur interprétation est grandement améliorée si elles sont étayées par des données biologiques conduisant à des modèles biologiques convaincants. Ces derniers offrent une bonne base pour l'interprétation des données épidémiologiques, essentiellement parce qu'ils suggèrent des relations dose-réponse dont les paramètres peuvent être adaptés aux résultats observés dans les études épidémiologiques. L'information fournie par la biologie expérimentale est aussi complétée par la connaissance biophysique du dépôt initial d'énergie par les rayonnements dans les tissus exposés. Les résultats théoriques et expérimentaux sont ainsi combinés pour obtenir une relation quantitative entre la dose et la probabilité d'incidence du cancer pertinent.

A. Radiobiologie

1. La cible de l'action des rayonnements

17. L'acide désoxyribonucléique (ADN), matériau génétique des cellules, est la cible la plus importante de l'action des rayonnements. La recherche cellulaire in vitro a donné la preuve indiscutable que les effets nocifs des rayonnements découlent du dommage qu'ils causent dans l'ADN cellulaire.

18. L'ADN est présent dans les chromosomes, qui sont les éléments essentiels du noyau de la cellule. Avant chaque division d'une cellule somatique, les chromosomes sont dédoublés, de sorte que chacune des deux descendantes reçoit un ensemble identique de chromosomes. Chaque espèce mammifère est caractérisée par un caryotype particulier et constant quant au nombre, à la taille et à la morphologie des chromosomes.

19. Pour expliquer les mécanismes par lesquels les rayonnements ionisants provoquent des dommages dans les cellules, il faut donner une description simplifiée du rôle de la molécule d'ADN. Bien que le maintien de la structure chromosomique général soit crucial pour divers processus impliquant l'ADN, c'est le polymère lui-même qui est la source de l'information qui passe d'une cellule à ses descendantes. Cette information est codée dans une séquence linéaire de structures moléculaires en alternance, appelées les paires de bases qui forment des liens entre les deux brins de la structure de la double hélice de l'ADN.

20. Le code par paires de bases dans l'ADN est disposé en groupes, chacun d'eux constituant l'unité élémentaire de l'information cellulaire et de l'hérédité, le gène. Dans une cellule de mammifère, on peut estimer à environ 100 000 le nombre des gènes, chacun d'eux dépendant, pour assurer correctement sa fonction, du maintien d'une séquence constante des bases de l'ADN. Des modifications dans ces séquences, par substitution de paires, perte ou addition, peuvent altérer la fonction du gène. Ces altérations sont appelées mutations génétiques.

21. On sait que l'ADN est endommagé par les rayonnements. Deux mécanismes sont impliqués : a) effets directs de l'ionisation sur la structure de l'ADN; b) effets indirects dus à la production de radicaux chimiques actifs au voisinage de l'ADN et à la diffusion de ces radicaux dans l'ADN, où ils induisent des modifications chimiques. Les deux types d'effets, directs et indirects, sont de nature probabiliste, la probabilité de leur manifestation augmentant avec la dose de rayonnements et avec le volume de la cible. Il existe de nombreuses autres causes de dommage à l'ADN, y compris les erreurs de réplication lors de la division cellulaire.

22. Le dommage induit dans l'ADN par les rayonnements ou par toute autre cause est sujet à des mécanismes de réparation très efficaces, régis par l'action d'enzymes. Dans le cas d'un dommage monocaténaire, les mécanismes de réparation trouvent facilement la séquence de bases correcte à reproduire, parce que l'information nécessaire est fournie par les bases complémentaires sur l'autre brin d'ADN. La réparation est alors hautement probable; mais, comme dans tout système complexe, elle n'est pas toujours totalement sûre. Parfois, un seul événement ionisant peut endommager simultanément les deux brins d'ADN; en pareil cas, la réparation peut être plus difficile et des altérations ou des pertes du code génétique sont plus probables.

23. La trace d'un rayonnement consiste en une série d'événements distincts, dont chacun entraîne un dépôt localisé d'énergie. Si ce dépôt est au voisinage immédiat de l'ADN et est suffisamment important, il peut entraîner un endommagement moléculaire des bases ou hélices d'ADN. La nature et la probabilité de ces dommages causés à l'ADN dépendent de la densité du dépôt d'énergie le long des traces qui traversent l'ADN et aussi des relations complexes entre le dommage et les enzymes réparateurs de la cellule. Dans le cas des rayonnements ionisants peu denses, les rayons X par exemple, l'effet net de ces processus est tel que la relation entre la dose et l'effet résultant de la plupart des effets stochastiques est curvilinéaire. Les rayonnements ionisants denses, tels que ceux qui sont dus aux particules alpha et aux protons produits par les neutrons, produisent davantage d'effets stochastiques et, dans leur cas, la relation dose-effet tend à être plus linéaire.

24. Outre ces effets en un seul point de l'ADN, la présence d'un certain nombre de paires d'ions réparties dans le noyau peut provoquer des dommages cellulaires qui compliquent le schéma simple de réponse décrit ci-dessus.

25. Quels que soient les détails du mécanisme biologique, la probabilité qu'un rayonnement induira des modifications spécifiques dans le code génétique cellulaire par des traces isolées et par l'interaction additionnelle de traces multiples peut être exprimée comme la somme de deux termes : l'un proportionnel à la dose et l'autre proportionnel au carré de la dose. Aux faibles doses, quel que soit le débit de dose, et aux doses élevées avec un faible débit de dose, seul le terme proportionnel à la dose est à prendre en considération. Aux doses élevées avec un débit de dose élevé, les deux termes sont pertinents. Dans le cas de rayonnements fortement ionisants, par exemple les particules alpha, les traces par unité de dose sont moins nombreuses, mais plus denses, et chaque trace risque davantage de provoquer un dommage qui ne sera pas convenablement réparé, de sorte qu'il est plus probable que la relation sera proportionnelle à la dose pour toutes les doses et tous les débits de dose.

26. Lorsque des tissus humains sont exposés aux rayonnements, diverses altérations du code génétique (mutations) sont induites selon des probabilités qui dépendent de la dose, comme on l'a vu ci-dessus. Pour une altération donnée, le nombre de cellules modifiées auxquelles il faut s'attendre est le produit de la probabilité par le nombre de cellules "à risque". On estime que ces cellules à risque sont les cellules souches des tissus, c'est-à-dire les cellules qui maintiennent les tissus par division, compensant ainsi la perte de cellules qui arrivent à maturité, se différencient et meurent, dans ce que l'on appelle le cycle de reproduction cellulaire.

2. Effets de modifications induites dans le code génétique cellulaire

27. Certaines modifications du code génétique cellulaire sont incompatibles avec la reproduction continue de la cellule, ce qui entraîne la mort de la progéniture de la cellule. Sauf si de nombreuses cellules sont détruites, il n'y a généralement pas de conséquence pour les tissus et organes, du fait du très grand nombre de cellules dans le tissu et de la très importante redondance de leurs aptitudes fonctionnelles.

28. La destruction cellulaire par les rayonnements peut être étudiée quantitativement dans des cultures de cellules in vitro; on obtient ainsi des informations sur la forme de la relation dose-réponse. Des accidents radiologiques et des expériences in vivo sur des animaux ont montré que des doses élevées peuvent provoquer une déplétion suffisante pour provoquer une dysfonction. À leur tour, les effets déterministes dans certains tissus, par exemple les tissus vasculaires et conjonctifs, causent des dommages secondaires à d'autres tissus.

29. D'autres types de modifications dans le code génétique cellulaire se traduisent par des cellules viables, mais modifiées. Certaines de ces cellules appartiennent aux lignées cellulaires gonadales (ovule ou sperme) et leur modification aura des effets héréditaires. D'autres resteront dans les tissus exposés, et seront des causes potentielles d'effets somatiques. Dans les deux cas, les effets sont stochastiques, régis par la nature probabiliste de l'induction de modifications dans le code génétique cellulaire.

a) Effets déterministes

30. Alors que la destruction d'une cellule individuelle est un effet stochastique, la dysfonction d'organes et de tissus exige la destruction d'un grand nombre de cellules et il y a donc des doses liminales. La déplétion

cellulaire est un processus dynamique, qui va à l'encontre de la prolifération des cellules qui ne sont pas atteintes; les déficiences tissulaires dépendent donc également du débit de dose. Ces effets sont appelés "déterministes", parce que la stochasticité individuelle dans un grand nombre de cellules se traduit par un déterminisme collectif.

31. Comme la proportion de cellules détruites dépend de la dose, la gravité de l'effet déterministe dépend aussi de la dose. Si un groupe de personnes ayant des sensibilités variables est exposé aux rayonnements, le seuil clinique de gravité pour les effets déterministes dans un tissu donné sera atteint avec des doses plus faibles chez les individus les plus sensibles. À mesure que la dose augmente, un plus grand nombre d'individus subissent cet effet, jusqu'à ce que la dose soit telle que le groupe entier le subisse.

32. Comme exemples d'effets déterministes on peut citer : l'induction d'une stérilité temporaire ou permanente dans les testicules et les ovaires; la dépression des tissus hématopoïétiques, ce qui entraîne une diminution du nombre des cellules sanguines; l'apparition de rougeurs, de desquamation et de vésication de la peau; l'induction d'opacités dans le cristallin et l'affaiblissement de la vue (cataracte); des processus inflammatoires dans pratiquement tous les organes. Certains effets sont indirects, en ce sens qu'ils résultent d'effets déterministes sur d'autres tissus. Par exemple, les effets des rayonnements sur des tissus de vaisseaux sanguins, provoquant une inflammation et finalement une fibrose, peuvent entraîner des dommages dans les tissus irrigués par ces vaisseaux sanguins.

33. Un cas particulier d'effet déterministe est le "syndrome des rayonnements", qui résulte d'une irradiation aiguë de l'organisme entier. Si la dose est suffisamment élevée, la mort peut être l'aboutissement d'une grave déplétion cellulaire et d'une inflammation dans un ou plusieurs organes vitaux du corps (organes hématopoïétiques, tractus gastro-intestinal et système nerveux central, dans l'ordre décroissant de sensibilité).

34. Au cours du développement d'un organe in utero, les effets déterministes des rayonnements sont induits le plus efficacement lors de la formation du tissu pertinent. La destruction de seulement quelques cellules essentielles peut se traduire par des malformations dues à l'absence de progéniture de ces cellules. Un effet très important de l'irradiation in utero est une aggravation de l'arriération mentale, qui est fonction de la dose et va croissant jusqu'à la débilité mentale profonde.

35. On pense que l'induction d'une arriération mentale est le résultat d'une prolifération déficiente, d'où l'imperfection de la différenciation, de la migration et de la connexion des cellules nerveuses lors de la structuration du tissu pertinent (le cortex cérébral), c'est-à-dire entre la huitième et la quinzième semaine après la conception chez les êtres humains. Le nombre des cellules nerveuses mal connectées dépend de la dose. Si, dans une première approximation, on admet que le degré d'arriération mentale est proportionnel à ce nombre, il faut s'attendre que les indices standard des fonctions de cognition (c'est-à-dire le quotient intellectuel, QI) exprimeront cette dépendance de la dose.

36. Dans des groupes de population, la distribution des QI est à peu près "normale" (gaussienne) et, par convention, est en moyenne égale à 100. Étant donné que la valeur moyenne du QI diminue à mesure que la dose de rayonnements augmente, apparemment sans qu'il y ait une augmentation de l'écart type, on peut

décrire la diminution des valeurs du QI comme un déplacement uniforme de la courbe des QI vers la gauche (vers des valeurs plus faibles). Si l'on définit une condition pathologique comme ayant un QI inférieur à une valeur stipulée, le déplacement décrit ci-dessus signifiera qu'un plus grand nombre d'individus sont atteints de la condition pathologique en question. Ce fait est important pour l'interprétation des données épidémiologiques concernant l'arriération mentale radio-induite, qui est traitée plus loin sous II.B.1.

b) Induction de cancers

37. Il est nettement établi que la majorité des cancers, sinon tous, ont pour origine un dommage à des cellules individuelles. Le cancer prend naissance dans un dérèglement de la croissance, de la reproduction et du développement de cellules souches somatiques, c'est-à-dire dans une perte de contrôle du cycle de reproduction cellulaire et des processus de différenciation. Les mutations ponctuelles et le dommage chromosomique jouent un rôle dans l'initiation de néoplasies. Cette initiation peut résulter de l'inactivation de gènes suppresseurs de tumeurs, dont certains jouent un rôle crucial dans le contrôle du cycle cellulaire. Bien que des cellules puissent avoir subi des modifications initiatrices, elles n'exprimeront pas leurs propriétés tant qu'elles n'auront pas été incitées ("stimulées") à proliférer par des produits chimiques, des hormones, etc., présents dans leur environnement. Les agents stimulants peuvent être totalement indépendants de l'agent incitateur.

38. Des modifications uniques dans le code génétique cellulaire sont généralement insuffisantes pour produire une cellule complètement "transformée", capable de conduire à un cancer; plusieurs mutations (peut-être 2 à 7) sont nécessaires. Dans les cancers spontanés, ces mutations sont survenues de manière aléatoire au cours de la vie. Ainsi, même après une transformation initiale de la cellule et sa stimulation, d'autres mutations sont nécessaires pour compléter la transition clonale d'un préneoplasme à un cancer manifeste. L'ensemble de ce processus a été appelé la carcinogenèse à étapes.

39. Il est possible que les rayonnements agissent à plusieurs stades de la carcinogenèse à étapes, mais leur rôle principal semble être la conversion initiale de cellules souches normales en un état préneoplasique induit. L'action des rayonnements n'est que l'un des nombreux processus qui influent sur le développement du cancer; c'est pourquoi l'âge auquel le cancer radio-induit se manifeste n'est pas très différent de l'âge auquel s'expriment les cancers spontanés. Dans certaines circonstances, toutefois, des étapes ultérieures peuvent être affectées par les rayonnements, ce qui entraîne un raccourcissement de la période de latence du cancer.

40. L'initiation du cancer donne aux cellules cibles un certain avantage prolifératif ou sélectif, qui se manifeste après une promotion appropriée. Cet avantage peut être un temps de reproduction plus court que celui des cellules normales, ou un blocage de la différenciation de cellules normales. D'un autre côté, les rares cellules transformées sont plongées dans un nombre extrêmement supérieur de cellules normales, et leurs propriétés préneoplasiques peuvent être supprimées par leurs voisins. La libération de ces contraintes est une caractéristique cruciale du processus néoplasique.

41. Même avec l'avantage prolifératif, les cellules transformées et leur progéniture peuvent également être éliminées par le processus aléatoire de reproduction, différenciation terminale et mort, c'est-à-dire à un état stable dans les tissus matures. La probabilité d'une élimination dépend du nombre de

cellules transformées et de la mesure dans laquelle elles sont devenues autonomes. Au moins une cellule doit donner un clone de cellules modifiées pour qu'un cancer apparaisse. La probabilité de ce phénomène peut être décrite par le même genre de relation avec la dose (linéaire ou linéaire-quadratique) que pour les mutations cellulaires héréditairement transmissibles. Ceci vient à l'appui de la thèse que des événements cellulaires induits de manière aléatoire sont responsables de l'induction du cancer.

42. De nombreuses expériences sur des animaux confirment la forme prévue pour la relation dose-réponse. Il convient de mentionner qu'aux doses plus élevées la destruction cellulaire est importante, entrant en compétition avec la transformation cellulaire et provoquant l'infléchissement vers le bas de la courbe dose-réponse. En particulier, il faut souligner que :

a) Sauf si l'origine monocellulaire de la plupart des cancers est peu probable, il ne faut s'attendre à aucun seuil de la dose;

b) Si l'irradiation agit essentiellement comme un événement initiateur, provoquant l'une des plusieurs mutations nécessaires, on peut s'attendre que les modèles multiplicateurs de projection des risques dans le temps seront plus réalistes que les modèles additifs (voir aussi II.B.2).

43. L'évaluation des risques de cancer à la suite d'expositions à de faibles doses et débits de dose pose des problèmes, du fait que la plupart des données sur les êtres humains ne concernent que les doses et débits de dose élevés. La démarche habituelle pour l'évaluation des risques consiste à adapter aux données une relation dose-réponse linéaire, procédure généralement considérée comme donnant une limite supérieure du risque aux faibles doses. Il en est ainsi parce que le terme quadratique de la relation augmentera la réponse aux doses et débits de dose élevés, entraînant une augmentation de la pente de la courbe linéaire ajustée. D'après des considérations radiobiologiques, il est alors possible d'évaluer le facteur par lequel la pente de la courbe ajustée doit être réduite pour obtenir une estimation de la composante linéaire de la relation linéaire-quadratique. On commence à disposer d'informations directes sur les expositions à de faibles doses, ce qui permettra de vérifier avec de plus en plus de précision les estimations dérivées des données sur les expositions à des doses élevées.

44. De nouvelles méthodes d'étude de la transformation cellulaire in vitro et des études aux niveaux cellulaire et moléculaire avec ces méthodes et avec des néoplasmes animaux devraient être des sources très productives de renseignements sur les mécanismes d'induction de cancers. Les études modernes en biologie cellulaire et moléculaire permettront peut-être de faire la différence entre les cancers radio-induits et les autres cancers. Si des échantillons de tumeurs dans des groupes humains exposés aux rayonnements étaient systématiquement collectés, ils pourraient constituer une ressource très importante pour les études futures sur les mécanismes de l'oncogenèse et pour l'établissement d'une relation de causalité entre le cancer dans une population et l'exposition aux agents carcinogènes, physiques ou chimiques, présents dans l'environnement.

c) Effets héréditaires

45. Si la modification du code génétique survient dans les cellules germinales, autrement dit, l'ovule ou le sperme ou les cellules qui les produisent, l'effet est transmis et peut se manifester sous la forme de désordres héréditaires chez les descendants des individus exposés. Des études expérimentales sur des

végétaux et des animaux montrent que ces effets peuvent aller d'une dysfonction minimale à une dysfonction majeure, des désordres anatomiques et un décès prématuré.

46. Tout dommage non léthal à l'ADN de cellules germinales peut, en principe, être transmis aux générations suivantes. Chez l'homme, la gravité des effets héréditaires varie fortement. Des mutations dominantes, c'est-à-dire des modifications du code génétique qui ont un effet clinique quand elles sont héritées d'un seul parent, peuvent conduire à une affection génétique dans la première génération de descendants. Certaines de ces affections sont très délétères pour l'individu atteint et affectent l'espérance de vie et le pouvoir reproducteur. Certaines mutations dominantes peuvent ne pas se manifester dans plusieurs générations puis apparaître soudainement. C'est le cas si le gène est modéré par d'autres ou empreint, c'est-à-dire si son expression dépend du sexe du parent dont il est hérité.

47. Les mutations récessives sont des modifications du code génétique qui n'ont d'effet clinique que si deux exemplaires du gène défectueux ont été transmis, normalement un par chaque parent. Elles ont peu d'effets dans les premières générations suivantes, étant donné que la plupart des descendants ne recevront le gène défectueux que d'un seul parent. Toutefois, les mutations récessives peuvent s'accumuler dans le pool génétique de la population, du fait que chaque porteur transmet la mutation à de nombreux descendants. À mesure qu'augmente la probabilité que les deux parents soient porteurs de la mutation, il y a augmentation du risque qu'un enfant hérite de deux exemplaires du gène défectueux et subisse les effets nocifs de la mutation.

48. Dans le cas des mutations récessives, deux points sont importants. Une mutation récessive a souvent un certain effet, si faible soit-il, même s'il n'est pas répété, et peut représenter un désavantage quant au pouvoir reproducteur. En outre, des mutations récessives introduites dans le pool génétique sont soumises à des processus qui tendent à les éliminer (élimination aléatoire, appelée "dérive", et sélection fondée sur le désavantage). C'est pourquoi des mutations récessives récemment injectées dans le pool génétique provoquent un dommage total certain sur les générations de descendants.

49. Un troisième type, assez fréquent, de condition pathologique est dû à l'interaction de plusieurs facteurs génétiques et environnementaux : ce sont les "affections multifactorielles". Une augmentation générale des mutations peut augmenter l'incidence des affections multifactorielles. L'ampleur de cette augmentation n'a pas encore été précisée et est probablement faible.

B. Épidémiologie

50. Interprétées avec l'aide des connaissances biologiques, les études épidémiologiques permettent d'évaluer les conséquences des radioexpositions. De nombreuses études qualitatives confirment aussi qu'à des doses suffisamment fortes, les rayonnements peuvent induire des cancers dans la plupart des tissus et organes du corps. Il existe cependant plusieurs exceptions importantes. À l'heure actuelle, les trois principales sources de données sur les effets stochastiques des rayonnements chez l'homme sont les études épidémiologiques sur les survivants des bombardements atomiques d'Hiroshima et Nagasaki, sur des patients ayant subi une radiothérapie ou des examens radiologiques et sur quelques groupes de travailleurs exposés professionnellement aux rayonnements ou à des substances radioactives. Comme on le verra dans la présente section, il n'est guère probable que les expositions aux sources naturelles (radon non

compris) donneront des indications sur les effets stochastiques, mais certains événements entraînant des niveaux importants d'exposition au radon ou une contamination importante du milieu à la suite d'accidents permettront peut-être de repérer d'autres groupes dont l'étude serait intéressante.

51. L'épidémiologie a pour objet d'établir des schémas de la manifestation de maladies, d'associer ces schémas aux causes probables, puis de quantifier ces associations. Il s'agit d'un processus d'observation et de déduction. Les études épidémiologiques reposent, de par leur nature, sur l'observation : elles dépendent des circonstances et non d'un plan d'expérience. On peut choisir les groupes à étudier et les méthodes d'analyse des données, mais il est rarement possible de modifier les conditions auxquelles sont soumises les populations en cause, ni la distribution des causes envisagées. Cela étant, l'épidémiologie a peu de points communs avec une science expérimentale.

52. Trois types d'études épidémiologiques ont été examinés par le Comité : les études de cohorte, les études cas-témoins et les études de corrélation géographique. Dans les études de cohorte, un groupe d'individus, la cohorte, est choisi en fonction de son exposition à un agent donné, sans référence à l'affection considérée, par exemple un cancer. Ensuite, il est suivi dans le temps pour enregistrer l'incidence de la maladie ou la mortalité qu'elle provoque. On évalue l'exposition des membres de la cohorte à l'agent censé être la cause de la maladie, soit à l'aide de mesures actuelles, par exemple pour l'exposition professionnelle, soit à l'aide d'études rétrospectives. Il est alors possible, grâce aux méthodes épidémiologiques normales, de comparer les taux d'incidence de la maladie ou les taux de mortalité en fonction de l'exposition à différentes doses.

53. Si tous les membres de la cohorte ont été exposés et si l'éventail des expositions n'est pas suffisamment large pour obtenir plusieurs groupes soumis à différents niveaux d'exposition, il faut comparer l'expérience de la cohorte à celle d'une cohorte témoin d'individus soumis à des expositions nettement plus faibles. Idéalement, les deux cohortes devraient être pratiquement analogues quant aux caractéristiques pouvant avoir une influence sur l'incidence de l'affection considérée ou la mortalité qu'elle provoque. Sinon, ces caractéristiques peuvent agir comme des facteurs de confusion, déformant la relation observée entre l'affection et l'exposition. Même au sein d'une cohorte, il peut y avoir des différences dans les facteurs de confusion possibles entre les groupes soumis à différents niveaux d'exposition. Si l'on possède des données sur les valeurs de ces facteurs pour les membres de la cohorte, il peut être possible d'en tenir compte. Dans le cas du cancer, il faut toujours tenir compte des deux facteurs évidents que sont l'âge et le sexe; mais il peut y avoir des facteurs plus subtils qu'il est impossible de déceler et de quantifier.

54. Une importante étude de cohorte est l'Étude permanente des survivants des bombardements atomiques d'Hiroshima et Nagasaki. Il s'agit d'une très large cohorte, où tous les âges et les deux sexes sont représentés et où les niveaux d'exposition étaient très variables. Environ 60 % des membres de la cohorte initiale sont encore vivants, de sorte que les conclusions actuelles sont toujours fondées sur des données incomplètes, notamment pour les individus exposés dans l'enfance, mais elle reste la plus importante étude de cohorte utilisée par le Comité.

55. Dans le second type, l'étude cas-témoins, on se propose de déterminer tous les cas de l'affection considérée dans une population bien définie, par exemple

les résidents d'une région donnée pendant une période de temps donnée, en choisissant pour chaque cas un ou plusieurs témoins parmi les membres de la même population qui ne sont pas atteints de cette affection. Les cas et les témoins peuvent alors être comparés, pour voir s'ils ont été soumis à des expositions très différentes. Comme dans le cas des études de cohorte, il faut veiller soigneusement à éviter les effets de facteurs de confusion. Pour ce faire, il faut apparié les cas et les témoins selon des facteurs tels que l'âge et le sexe, ou appliquer des méthodes statistiques particulières dans l'analyse.

56. Comme il suffit d'étudier les cas et les témoins appariés, les études cas-témoins peuvent donner des résultats significatifs avec des groupes plus restreints que ceux qui sont nécessaires dans les études de cohorte. Les études cas-témoins sont donc très utiles lorsque le rassemblement de données sur les expositions individuelles exige un travail sur le terrain détaillé et approfondi, rendant les études de cohorte impossibles ou extrêmement coûteuses. Les études cas-témoins sont particulièrement indiquées pour examiner les effets de l'exposition au radon dans les bâtiments sur le risque de cancer du poumon. Dans ce cas précis, il est important de tenir compte du tabagisme, pour lequel les historiques qui serviraient à l'étude de cohortes sont presque toujours rares ou peu fiables. On peut rechercher des données dans des études de cas.

57. Le troisième type est l'étude de corrélation géographique. Ces études sont généralement les plus faciles à mener, mais elles sont les plus difficiles à interpréter et les plus enclines à l'erreur. Dans une étude de corrélation géographique, deux ou plusieurs groupes de population sont choisis en des lieux différents, en fonction d'une différence d'exposition de longue durée aux rayonnements, le plus souvent à des sources naturelles. Les statistiques médicales pour les groupes considérés sont alors comparées pour déterminer toutes différences pertinentes. Cette méthode tient compte dans une certaine mesure de la différence d'exposition moyenne entre les groupes, mais ignore la distribution des expositions à l'intérieur des groupes, des données à ce sujet étant rarement disponibles. Si d'importants facteurs de confusion, tels que l'âge, le régime alimentaire ou la pollution, sont mis en relation avec les niveaux d'exposition, on risque d'aboutir à des conclusions totalement fausses. Jusqu'à présent, les études de corrélation géographique n'ont pas présenté beaucoup d'intérêt pour le Comité, essentiellement parce qu'il est difficile de trouver des groupes présentant des différences d'exposition importantes et bien établies, mais très peu de différences quant aux facteurs de confusion.

58. Pour fournir des renseignements utiles, les études épidémiologiques, quelles qu'elles soient, doivent être soigneusement conçues, exécutées et interprétées. De plus, les études prévoyant une faible augmentation en valeur absolue de l'incidence d'affections existant déjà naturellement, tel le cancer, doivent être très étendues pour donner des renseignements statistiquement significatifs. Il existe deux principales limites aux études épidémiologiques : l'une d'ordre statistique, donnant lieu à des erreurs aléatoires; l'autre d'ordre démographique, donnant lieu à des erreurs systématiques.

59. Dans de nombreux pays, la probabilité à tout âge de mourir d'un cancer est d'environ 20 %. Si l'on compare deux populations pour déterminer avec certitude l'effet d'une dose plus élevée de rayonnements dans l'une d'elles, il est nécessaire d'obtenir une différence entre elles qui soit statistiquement significative. Pour pouvoir déceler une augmentation de la mortalité de 20 % à 22 %, par exemple, chacun des deux groupes doit comprendre au moins 5 000 personnes. En suivant ces groupes jusqu'à leur extinction, on pourrait observer par exemple un millier environ de décès, dus au cancer dans le groupe

non exposé et environ 1 100 cas dans le groupe exposé. Les limites de confiance à 90% concernant l'écart seraient de l'ordre de 0-200, juste significatives. Avec les évaluations actuelles du risque, cette augmentation résulterait d'un accroissement de la dose au corps entier, la vie durant, de 0,4 Sv. Ceci correspond à un accroissement par le facteur 5 de la dose la vie durant reçue des sources naturelles autres que le radon (0,001 Sv par an) pendant les 70 ans de vie du groupe exposé (0,001 x 70 x 5).

60. La deuxième limitation résulte du besoin d'apparier le groupe étudié et le groupe témoin pour tous facteurs de confusion pouvant influencer sur l'incidence du cancer. À moins que les deux groupes ne fassent partie d'une même population homogène, il est rarement possible d'apparier les groupes ou de tenir compte des différences avec suffisamment de précision pour déceler en toute certitude une petite augmentation de la mortalité due au cancer. Toute erreur dans l'appariement des deux groupes peut provoquer un biais qu'il est impossible de réduire simplement en augmentant la taille des groupes.

61. La probabilité d'un biais impose de sévères limitations à la valeur d'études de corrélation géographique de la mortalité dans des groupes éloignés géographiquement l'un de l'autre, tels que ceux que l'on utilise dans les études sur les effets de différents niveaux d'exposition au fond naturel. Ceci souligne l'importance des études de cohorte, dans lesquelles une seule population peut être subdivisée en groupes soumis à divers niveaux d'exposition. Il peut encore rester des facteurs de confusion qui diffèrent d'un groupe à l'autre, mais ils sont sans doute beaucoup moins importants qu'entre des groupes séparés géographiquement. Les populations qui peuvent être subdivisées en fonction du niveau d'exposition sont celles de l'Étude permanente sur Hiroshima et Nagasaki, des groupes de patients faisant l'objet d'une radiothérapie et certains groupes exposés professionnellement. En raison de ces limites, il importe d'évaluer la faisabilité de toute étude épidémiologique avant de décider de l'entreprendre.

62. Une grande partie des données quantitatives fournies par les études de ces populations est limitée à des doses et des débits de dose relativement élevés. Des évaluations des risques à des doses plus faibles ne peuvent être obtenues que par extrapolation vers le bas des résultats à des doses élevées. L'éventail de cette extrapolation n'est pas très large, parce que les faibles doses intéressantes se surimposent aux doses inévitables dues aux sources naturelles.

63. Dans son rapport de 1988, le Comité a analysé de manière détaillée les données concernant les doses élevées fournies par des études épidémiologiques, en mettant l'accent sur les données relatives à Hiroshima et Nagasaki. Il est trop tôt pour répéter cette analyse des données japonaises, mais on a pu tenir compte des données disponibles et réévaluer les précédentes conclusions. On a entrepris une vaste étude des diverses méthodes d'interprétation des données. En particulier, on a étudié les modèles disponibles de projection du risque pour faire des évaluations des probabilités de décès, la vie durant, dus à une radioexposition. Le Comité a également utilisé les résultats d'autres études, notamment de données récemment publiées sur les effets de l'exposition professionnelle à des doses faibles à modérées. Ces données viennent compléter les résultats de l'Étude permanente, mais elles n'ont pas une valeur statistique suffisante pour modifier les évaluations quantitatives du risque. Les études épidémiologiques ne donnent pas de résultats utiles pour évaluer les risques dus au rayonnement par les doses faibles. Il faut encore confirmer par des études expérimentales les extrapolations pour cette gamme de doses. Le Comité, donc, a associé les études épidémiologiques à un examen général des mécanismes de la

carcinogénèse humaine et des effets de la dose et du débit de dose sur la réponse à l'irradiation. Le résultat d'ensemble devrait confirmer les estimations du risque contenues dans le rapport du Comité pour 1988.

64. Malgré le grand nombre d'études épidémiologiques faites dans le monde, l'accumulation de résultats quantitatifs est nécessairement lente. Par exemple, plus de la moitié des cohortes de Hiroshima et Nagasaki sont encore en vie et le nombre de morts excédentaires dues à un cancer, environ 350 à ce jour, augmente lentement. Le Comité a consacré beaucoup de temps et de moyens à de vastes analyses scientifiques des incidences que mettent en évidence les études dont il a connaissance et n'a pas établi d'annexe dans l'intention de la publier actuellement. Les conclusions du Comité sont exposées succinctement sous II.B.2, dans le présent rapport.

III. ÉVALUATIONS QUANTITATIVES DES EFFETS DES RAYONNEMENTS

A. Quantités et unités

65. Un ensemble spécifique d'unités est nécessaire pour décrire et quantifier les rayonnements et leurs effets biologiques. D'amples détails sur les quantités et unités radiologiques, ainsi qu'une explication des dérivations et variations dans l'utilisation de ces notions, ont été présentés dans le rapport de 1988 du Comité. Le Comité utilise les quantités et unités conformément à la pratique internationale en vigueur.

1. Quantités dosimétriques

66. On peut caractériser les radionucléides en disant qu'ils sont des configurations instables d'atomes. Ils se désintègrent du fait de transitions nucléaires spontanées, avec émission de particules alpha, de rayonnement bêta ou de rayons gamma. Le taux de désintégration caractéristique de chaque radionucléide est déterminé par sa période, qui est le temps nécessaire pour que la moitié de ses atomes aient été transformés. Le rythme des transitions ou désintégrations est appelé l'activité, dont l'unité est le becquerel (Bq). Une activité de 1 Bq signifie que les transitions ont lieu au rythme de une par seconde.

67. L'une des quantités fondamentales utilisées pour décrire les interactions des rayonnements avec la matière est la dose absorbée. C'est l'énergie impartie à un petit élément d'une matière, divisée par la masse de cette matière. L'unité de dose absorbée est le joule par kilogramme; on l'appelle le gray (Gy). Dans la plupart des cas, le Comité utilise la valeur moyenne de la dose absorbée dans un tissu ou par tout l'organisme, plutôt que la dose absorbée en un point. La plupart des expositions aux rayonnements entraînent différentes doses absorbées dans les diverses parties du corps humain. Les doses absorbées émanant de différents types de rayonnements ont des efficacités biologiques différentes; les organes et les tissus du corps ont des sensibilités différentes.

68. Pour une même dose absorbée, les rayonnements densément ionisants causent davantage d'effets biologiques, particulièrement d'effets stochastiques, que les rayonnements faiblement ionisants (rayons gamma, rayons X ou électrons particules bêta). Il est utile de combiner les doses absorbées émanant de différents types de rayonnement pour obtenir une nouvelle quantité, appelée l'équivalent de dose. L'équivalent de dose dans un tissu ou organe du corps humain est la dose absorbée multipliée par un facteur de pondération du rayonnement qui va de l'unité, pour les rayonnements faiblement ionisants, à 20 pour les particules alpha.

69. Les différents organes et tissus du corps ne réagissent pas de la même façon aux radioexpositions. Pour tenir compte de ces variations, on utilise une autre quantité, la dose effective. L'équivalent de dose dans chaque tissu ou organe est multiplié par un facteur de pondération tissulaire; la somme de ces produits pour l'ensemble du corps est la dose effective. La dose effective indique le détriment total dû aux effets stochastiques chez les individus exposés et leurs descendants. Le facteur de pondération du rayonnement et le facteur de pondération tissulaire sont des quantités non mesurables; les dimensions de l'équivalent de dose et de la dose effective sont les mêmes que celles de la dose absorbée, et l'unité est la même : le joule par kilogramme. Toutefois, pour assurer une nette distinction entre la dose absorbée et ses

analogues pondérés, on a convenu de donner à l'unité d'équivalent de dose et à l'unité de dose effective un nom spécial : le sievert (Sv).

70. Le changement des valeurs des facteurs de pondération du rayonnement et de pondération tissulaire, en 1990, a compliqué les comparaisons des évaluations des doses faites avant et après cette date. En principe, le Comité n'a pas cherché à réévaluer les données anciennes d'après les nouvelles quantités, parce que les changements sont généralement faibles. Lorsque des réévaluations ont été faites, cela est mentionné dans le texte.

71. La dose absorbée, l'équivalent de dose et la dose effective s'appliquent aux individus. Le Comité utilise également la dose effective collective, qui est la dose moyenne à une population ou à un groupe multipliée par le nombre de personnes exposées. Cette quantité est généralement utilisée pour les doses résultant d'une source spécifiée ou d'une unité spécifiée d'une pratique. On peut également l'employer comme le total des doses futures engagées par cette source ou cette unité de pratique, par exemple : la dose effective collective engagée du fait des explosions nucléaires dans l'atmosphère ou du fait des expositions à des fins médicales pendant un an. Si la probabilité d'effets tardifs est proportionnelle à la dose effective aux faibles doses, ce qui est probablement le cas, la dose effective collective est une mesure du dommage total auquel il faut s'attendre pour ce groupe et sa descendance. Si les doses individuelles constituant une dose collective couvrent un vaste éventail de valeurs et s'étendent sur de très longues périodes de temps, il est préférable du point de vue informatif de subdiviser la dose collective en gammes plus restreintes de doses individuelles et de temps. L'unité de dose collective est l'homme-sievert (homme-Sv).

72. Certains événements, notamment ceux qui impliquent une libération de matériaux radioactifs dans l'environnement, peuvent donner lieu à des expositions qui se prolongent dans le temps, parfois pour plusieurs générations. En pareils cas, la dose collective reste une quantité utile, à condition de bien préciser que la dose collective est la dose engagée par la source ou l'unité de pratique considérée. Pour donner une indication de la dose engagée pour un individu typique, mais hypothétique, maintenant et dans l'avenir, le Comité utilise la quantité d'engagement de dose. L'engagement de dose est l'intégrale sur un temps infini (ou sur une période définie) de la valeur moyenne par habitant du débit de dose à une population spécifiée, souvent la population mondiale, du fait de cet événement. La dose considérée est presque toujours la dose effective. L'engagement de dose a été particulièrement utile pour déterminer les conséquences à long terme d'événements survenus au cours d'une période de temps limitée, par exemple une série d'explosions nucléaires dans l'atmosphère. L'unité d'engagement de dose effective est le sievert.

2. Risque et détriment

73. Le Comité a dû également adopter une méthode conséquente de description quantitative de la probabilité et la gravité des effets stochastiques d'une exposition aux rayonnements. Le terme risque a été largement utilisé dans ce contexte, mais sans la rigueur voulue. Il signifie parfois la probabilité d'un effet indésirable, mais, dans d'autres cas, il représente une combinaison de la probabilité et de la gravité du résultat. En conséquence, le Comité s'est efforcé d'éviter l'emploi de ce terme, sauf dans des expressions bien définies, telles que "excédent de risque relatif" et "modèle multiplicateur de projection du risque".

74. Un concept important pour le Comité est la probabilité d'un cancer mortel résultant d'une augmentation de l'exposition aux rayonnements. La probabilité annuelle varie avec le temps écoulé depuis l'exposition; l'expression la plus utile est la probabilité durant toute la vie de mourir prématurément du fait de l'exposition additionnelle. Ce n'est pas là un concept simple, étant donné que la probabilité durant toute la vie de mourir est toujours égale à l'unité. Toute exposition additionnelle à un péril provoquant une augmentation de la probabilité de décès pour une cause donnée entraîne une diminution de l'espérance de vie, ainsi qu'une diminution de la probabilité de décès pour toutes les autres causes.

75. La mesure qui convient le mieux au Comité pour exprimer le risque, la vie durant, de mort due à une radioexposition, est le risque de mort radio-induite, parfois appelée la probabilité la vie durant d'un cancer mortel imputable. Elle tient compte de ce que d'autres causes de décès peuvent survenir avant que le risque de mort due à une radioexposition puisse se manifester.

76. Étant donné que l'effet de l'exposition additionnelle est une diminution de l'espérance de vie, plutôt qu'une augmentation de la probabilité de décès, la probabilité imputable ne constitue pas un indicateur adéquat de l'effet d'une exposition. C'est pourquoi le Comité a également utilisé la durée moyenne de vie perdue du fait des décès imputables au cancer. La combinaison de cette valeur et de la probabilité la vie durant est une mesure de la diminution de l'espérance de vie. Toutes ces quantités peuvent être utilisées pour évaluer les conséquences d'une exposition aiguë ou d'une exposition chronique s'élevant à une dose connue. Si la gamme des expositions n'excède pas la valeur pour laquelle la relation dose-réponse est approximativement linéaire, les quantités en question peuvent également être exprimées par unité de dose. Quand la relation est de toute évidence non linéaire, les quantités peuvent être spécifiées pour une dose donnée, généralement une dose effective de 1 Sv.

77. Aux fins de la protection, la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) aborde de manière plus complexe la question du détriment. Elle tient compte de la probabilité imputable d'un cancer mortel dans différents organes, du détriment additionnel causé par un cancer non mortel et les troubles héréditaires, ainsi que des différentes périodes de latence pour les divers cancers. Tous ces paramètres sont utilisés dans le choix des facteurs de conversion permettant de convertir l'équivalent de dose en dose effective.

78. Le coefficient mettant en relation la probabilité d'un cancer mortel et la dose effective est ainsi une fonction de la répartition par âges et par sexe de la population exposée et de toute variation ethnique. Néanmoins, le Comité a jugé suffisant d'utiliser les valeurs théoriques adoptées par la CIPR pour la plupart de ses propres travaux, tout en reconnaissant que ces valeurs sont nécessairement approximatives, particulièrement chez les patients ayant subi une radioexposition médicale.

B. Effets sur l'être humain

79. Les effets des rayonnements, dont on a donné un aperçu dans la section I.A ci-dessus, peuvent être classés en déterministes ou stochastiques, d'une part, et somatiques ou héréditaires, d'autre part. Tous les effets déterministes sont somatiques, c'est-à-dire qu'ils se manifestent chez l'individu exposé, alors que les effets stochastiques peuvent être somatiques (cancer radio-induit) ou héréditaires.

80. Les effets déterministes étaient très fréquents au début de l'utilisation des rayonnements. Au cours de la période entre la découverte des rayons X et le début des années 30, plusieurs centaines de radiologistes sont morts d'effets déterministes. En outre, il y a eu des cas innombrables d'anémies et de dommages cutanés. Après l'institution de mesures de protection, les effets déterministes sont devenus de moins en moins fréquents; à l'heure actuelle, on ne les observe que dans le cas d'accidents ou comme un effet secondaire de traitements radiologiques.

81. L'induction du cancer a été décelée et quantifiée par l'épidémiologie dans divers groupes de personnes exposées. Elle semble constituer le seul effet somatique stochastique. Les effets stochastiques héréditaires des rayonnements n'ont pas encore été déterminés épidémiologiquement chez les humains, mais leur existence ne fait absolument aucun doute. Ils ont été identifiés dans toutes les formes de vie animale et végétale étudiées. Le manque de preuves épidémiologiques est dû au temps assez long entre les générations et au grand nombre d'individus nécessaire à la détection statistique.

1. Effets déterministes

82. Les tissus ont des réponses variables à l'irradiation. Parmi les plus sensibles, on trouve les ovaires, les testicules, le cristallin et la moelle osseuse. Le seuil, ou dose liminale, d'induction d'une stérilité temporaire chez l'homme est d'environ 0,15 Gy dans le cas d'une seule exposition aiguë, le seuil du débit de dose étant d'environ 0,4 Gy par an dans le cas d'expositions continues. Les valeurs correspondantes pour la stérilité permanente sont de 3,5-6 Gy (expositions aiguës) et 2 Gy par an (expositions continues). Chez les femmes, la dose liminale pour la stérilité permanente est de 2,5-6 Gy dans le cas d'une exposition aiguë, la sensibilité augmentant à l'approche de la ménopause. Dans le cas d'expositions continues pendant plusieurs années, le seuil du débit de dose est d'environ 0,2 Gy par an. Ces seuils, comme tous les seuils pour des effets déterministes, s'appliquent aux personnes en état de santé normal. Pour les individus qui sont déjà près d'accuser le même effet pour d'autres causes, le seuil sera plus faible. Même dans le cas extrême où l'effet est déjà présent, il y aura encore un seuil représentant la dose de rayonnements nécessaire pour provoquer une modification observable de la condition de l'individu.

83. Pour l'induction d'opacités du cristallin suffisantes pour entraîner, après un certain délai, un affaiblissement de la vue, la dose liminale est de 2-10 Gy pour les rayonnements faiblement ionisants (et environ 1-2 Gy pour les rayonnements fortement ionisants) dans le cas d'expositions aiguës. Le seuil du débit de dose pour les expositions continues à long terme n'est pas très bien connu, mais il est sans doute supérieur à 0,15 Gy par an pour les rayonnements faiblement ionisants.

84. Pour provoquer une dépression de l'hématopoïèse qui soit cliniquement significative, il faut une dose liminale à l'ensemble de la moelle osseuse d'environ 0,5 Gy dans le cas d'une exposition aiguë. Le débit de dose correspondant dans le cas d'exposition continue est quelque peu supérieur à 0,4 Gy par an. La déficience de la moelle osseuse est un élément important du syndrome des rayonnements dû à l'exposition de l'organisme entier. En ce cas, une dose aiguë à l'organisme entier de l'ordre de 3-5 Gy provoque le décès de 50 % du groupe de population exposé, en l'absence d'un traitement médical spécifique.

85. Pour les expositions cutanées, la dose liminale pour les érythèmes et desquamations sèches est de l'ordre de 3-5 Gy, les symptômes apparaissant quelque trois semaines après l'exposition. La desquamation séreuse survient après 20 Gy environ, la vésication apparaissant environ un mois après l'exposition. La nécrose tissulaire, qui se manifeste après trois semaines, exige des doses supérieures à 50 Gy.

a) Effets sur le cerveau en développement

86. Les études sur Hiroshima et Nagasaki n'ont révélé que deux effets manifestes sur le cerveau en développement. Il y a quelques cas d'arriération mentale grave et quelques cas de têtes de petite taille, sans arriération mentale apparente. En outre, dans quelques groupes exposés in utero, on a relevé des quotients intellectuels inférieurs à la moyenne et de mauvais résultats scolaires.

87. On a observé un excédent d'arriération mentale chez certains enfants exposés in utero à Hiroshima et Nagasaki. On n'a pas observé d'arriération mentale chez ceux qui avaient été exposés dans les huit semaines suivant la conception, la période la plus sensible était celle de 8-15 semaines après la conception, suivie d'une période beaucoup moins sensible : 16-25 semaines après la conception.

88. Comme indiqué au chapitre I, sous A.2 a), on pense que le mécanisme d'induction d'une arriération mentale est la production, en fonction de la dose, d'un certain nombre de dysconnexions de neurones dans le cortex cérébral. Ces dysconnexions provoquent un abaissement (déplacement vers la gauche) de la distribution des QI, dont la valeur est estimée à environ 30 points de QI par Sv pour les expositions pendant la période de 8-15 semaines après la conception.

89. Les distributions normales des QI ont une valeur moyenne stipulée de 100 points, avec un écart type d'environ 15 points. La région située à la gauche de deux écarts types de la valeur moyenne (valeurs inférieures à 70 points) correspond à la désignation clinique d'arriération profonde. Le déplacement radio-induit par une dose de 1 Sv introduirait dans cette région 40 % de cas additionnels d'arriération profonde.

90. Toutefois, compte tenu de la forme de la distribution gaussienne, la fraction de cas additionnels résultant d'un déplacement induit par une faible dose serait beaucoup moins importante que la valeur calculée directement d'après une relation linéaire de 40 % par Sv (plus faible d'environ un ordre de grandeur). La dose requise pour provoquer un déplacement du QI suffisamment important pour faire d'un individu par ailleurs normal un arriéré profond serait élevée (de l'ordre de 1 Sv ou plus), tandis que la dose requise pour faire passer un individu ayant déjà un faible QI dans la catégorie des arriérés profonds serait de quelques dixièmes de sievert.

b) Effets chez les enfants

91. Pendant l'enfance, lorsque les tissus connaissent une croissance active, les effets déterministes radio-induits auront souvent un impact plus profond qu'ils ne l'auraient chez des adultes. En exemples de dommages déterministes résultant de la radioexposition pendant l'enfance, on peut citer les effets sur la croissance et le développement, la dysfonction d'organes, les déficiences hormonales et leurs séquelles, et les effets sur les fonctions de cognition. La plupart des données disponibles proviennent de patients ayant subi une

radiothérapie; elles sont calculées à l'aide de nouvelles méthodes d'analyse et grâce à un suivi prolongé et soigneux. Le Comité a analysé ces données pour identifier la nature des effets dans divers tissus, ainsi que l'ampleur des doses provoquant ces effets.

92. De nombreux facteurs compliquent l'étude de la relation dose-effet. Parmi eux, l'affection sous-jacente et les modalités de traitement, qui comportent parfois la chirurgie et la chimiothérapie en plus de la radiothérapie. C'est pourquoi les évaluations des doses liminales chez des enfants en bonne santé restent entachées d'incertitudes importantes. On ne peut donner que des indications générales des niveaux. Sauf indication contraire, les doses ci-dessous sont délivrées au cours d'expositions fractionnées.

93. Les effets des rayonnements sur les testicules et les ovaires dépendent à la fois de l'âge et de la dose. La fonction testiculaire peut être compromise avec des doses de 0,5 Gy. Des doses de 10 Gy provoquent une déficience gonadale chez la plupart des garçons irradiés. Chez les filles, des doses de 0,5 Gy provoquent l'aménorrhée chez un petit nombre, la proportion augmentant jusqu'à environ 70 % après 3 Gy. Après des doses de 4 Gy, la stérilité se manifeste dans environ 30 % des cas. Une dose de 20 Gy provoque la stérilité permanente dans tous les cas.

94. De nombreux autres organes sont lésés par des doses de 10-20 Gy. A l'opposé, un dommage à la thyroïde peut n'être que d'environ 1 Gy. On a observé divers effets dans le cerveau, y compris l'atrophie du cortex, après une dose aiguë de 10 Gy ou une dose cumulée de 18 Gy, délivrée en 10 fractions environ. On a montré que le système endocrinien était affecté par les rayonnements, avec une sécrétion nettement altérée des hormones de croissance, après des doses fractionnées s'élevant au total à 18 Gy. Des doses à la thyroïde d'environ 1 Gy, délivrées en deux semaines, ont provoqué un hypothyroïdisme chez des patients traités par radiothérapie crânienne. Après des doses de 2 Gy, on a observé des cas de cataracte et d'hypotrophie des seins.

95. Des effets déterministes dans plusieurs autres organes ont été identifiés et quantifiés. Des doses de 8 Gy provoquent une diminution de la capacité pulmonaire totale; des doses de 11 Gy entraînent une restriction des échanges pulmonaires. A raison de cinq expositions par semaine pendant six semaines, il faut une dose totale de plus de 12 Gy pour provoquer un dommage au foie, et des doses échelonnées de l'ordre de 12 Gy sont suffisantes pour provoquer un dommage aux reins. On a fait état de néphrite radio-induite par une dose de 14 Gy. Une dose supérieure à 20 Gy est nécessaire pour arrêter la formation de tissus osseux, avec des effets partiels à la suite de doses de 10-20 Gy et aucun effet au-dessous de 10 Gy. Les doses au muscle cardiaque provoquant une défaillance clinique sont de l'ordre de 40 Gy.

2. Cancer radio-induit

96. L'analyse de l'information radiobiologique concernant la radio-induction du cancer a conduit à la formulation de modèles mécanistes, qui suggèrent le choix de la fonction dose-réponse. L'épidémiologie humaine offre les données à interpréter à l'aide de ces modèles, notamment pour l'extrapolation des données à la région des faibles doses, pour laquelle les données épidémiologiques sont rares ou extrêmement imprécises.

97. Étant donné que la période d'observation d'un échantillon de population exposée couvre rarement une vie entière, il est généralement nécessaire de faire

une projection de la fréquence d'induction de cancers obtenue pendant cette période d'observation pour la vie entière de la population exposée, afin d'obtenir le risque pendant toute la vie. À cette fin, on a utilisé deux modèles principaux : le modèle absolu ou additif et le modèle relatif ou multiplicateur.

98. Le modèle absolu (additif) simple suppose un excédent constant (fonction de la dose) de cancers induits pendant la durée de la vie, quel que soit le taux de cancers spontanés en fonction de l'âge. Le modèle relatif (multiplicateur) simple suppose que le taux de cancers induits augmente avec l'âge, comme un multiple constant (fonction de la dose) du taux de cancers spontanés. Les deux modèles peuvent être affinés pour remplacer les valeurs constantes par des fonctions du temps écoulé depuis l'exposition.

99. Le modèle additif simple n'est plus considéré comme compatible avec la plupart des observations épidémiologiques, et l'information radiobiologique semble préconiser le modèle multiplicateur. Il convient de noter, toutefois, qu'aucun des deux modèles simples ne s'adapte à toutes les données; par exemple, le modèle multiplicateur pose des problèmes dans le cas de l'exposition de jeunes enfants, et aucun des modèles simples de projection n'est compatible avec les données pour la leucémie ou le cancer des os.

100. Le Comité a examiné trois modèles de projection pour les tumeurs solides. Le premier est le modèle simple avec un facteur constant d'excédent de risque. Le deuxième et le troisième utilisent un facteur décroissant avec le temps plus de 45 ans après l'exposition. Bien que le risque de leucémie ne soit pas encore totalement exprimé chez les survivants des bombardements atomiques au Japon, le risque résiduel est maintenant suffisamment faible pour rendre inutile l'utilisation de modèles de projection différents.

101. Les deux modèles avec des facteurs décroissants du risque relatif diminuent les évaluations du risque la vie durant à la suite d'une exposition unique par un facteur d'environ 2 pour une exposition au cours de la première décennie de vie et un facteur de 1,5 dans la deuxième décennie, avec seulement un effet minime pour l'exposition à des âges plus élevés. Étant donné que la diminution de la probabilité survient à des âges élevés, ces modèles montrent une diminution de l'espérance de vie par cancer imputable légèrement plus élevée que ne le fait le modèle simple.

102. Un élément important dans l'évaluation des risques de cancer radio-induit aux faibles doses est le facteur utilisé pour évaluer la pente de la composante linéaire de la fonction linéaire-quadratique d'après l'adaptation directe, linéaire et sans seuil aux doses et débits de dose élevés des données épidémiologiques. Sur la base de l'information radiobiologique fondamentale, d'études sur des animaux et de données concernant l'induction du cancer chez l'homme, ce facteur est maintenant estimé, avec une incertitude importante, à environ 2 pour la gamme de doses fournie par les données épidémiologiques. Les résultats épidémiologiques n'excluent pas cette valeur, mais sauf pour la leucémie ils ne la confirment pas.

103. Dans son rapport de 1988, le Comité a calculé des facteurs de risque (risque par unité de dose) pour les doses et débits de dose élevés dans le cas de divers tissus. Aux fins du présent rapport, il suffit d'étudier le risque total de mortalité due au cancer après irradiation de l'organisme entier.

104. Au cours des dernières années, des études épidémiologiques ont porté sur des personnes exposées professionnellement, des groupes de population vivant dans des régions ayant des niveaux différents de fond naturel et des personnes exposées par la libération de matières radioactives dans leur environnement. Pour que de telles études puissent fournir des données quantitatives utiles sur les conséquences de l'exposition aux rayonnements, elles doivent porter sur des groupes de taille importante et sur de longues périodes. Historiquement, seules les études sur le cancer du poumon en fonction du radon chez des mineurs ont été à même de fournir des relations quantitatives, et elles sont propres au radon. À l'heure actuelle, les études les plus prometteuses d'application générale concernent des travailleurs exposés à différentes sortes de rayonnements au cours de leur travail. Ces études commencent maintenant à donner des résultats positifs.

105. La valeur statistique de ces études est encore faible, mais elle augmentera avec le temps, à mesure que les données s'accumuleront. Les résultats sont en accord avec ceux d'études sur les doses et débits de dose élevés; aucun ne donne à penser que les évaluations actuelles sous-estiment les risques.

106. Les données montrent maintenant avec une certitude raisonnable que les risques de cancers associés aux fortes doses de rayonnements faiblement ionisants sont environ trois fois plus élevés qu'on ne le pensait il y a 10 ans. En 1988, l'estimation de la probabilité de cancers mortels la vie durant, en utilisant le modèle multiplicateur de projection du risque, était de 11×10^{-2} par Sv pour les populations exposées à Hiroshima et Nagasaki, dont plus de la moitié de celles considérées dans l'étude épidémiologique sont encore vivantes. Les évaluations du Comité ont trait uniquement à la population japonaise représentée par la cohorte de l'Étude permanente. Les études se poursuivent mais on ne possède pas à ce jour de données suffisantes pour suggérer une modification des évaluations du risque.

107. Le Comité a examiné de combien il faudrait réduire le facteur de risque estimé dans les études sur les doses élevées pour l'appliquer aux doses faibles. Il n'a pu convenir d'un chiffre, mais celui-ci est manifestement faible. Les études japonaises laissent penser qu'il serait de l'ordre de 2 au plus. L'application du facteur 2 pour extrapoler aux faibles doses et débits de dose donne la valeur de 5×10^{-2} par Sv pour la probabilité de cancers mortels radio-induits la vie durant dans une population théorique de tous âges. On obtient une valeur moyenne quelque peu plus faible, environ 4×10^{-2} par Sv, pour une population active (entre 18 et 64 ans) exposée pendant la vie professionnelle. Le Comité suggère d'appliquer un facteur de réduction à toutes les doses inférieures à 0,2 Gy et aux doses supérieures lorsque le débit de dose est inférieur à 6 mGy par heure en moyenne pendant quelques heures.

3. Effets héréditaires

108. L'épidémiologie n'a pas décelé d'effets héréditaires des rayonnements chez les êtres humains avec un degré de confiance statistiquement significatif. L'estimation du risque résultant d'études sur les animaux est si faible qu'il aurait été étonnant de déceler un effet statistiquement significatif dans les cas limites étudiés à Hiroshima et à Nagasaki. Cependant, il ne peut pas faire de doute qu'il existe des effets héréditaires chez l'être humain. De ce fait, les évaluations du risque reposent entièrement sur des expériences génétiques sur une vaste gamme d'organismes et sur des études de biologie cellulaire, avec l'appui limité d'observations négatives sur des êtres humains.

109. Le Comité a appliqué deux méthodes très différentes pour estimer le risque génétique. L'une d'elles (indirecte) consiste à doubler la dose. Cette évaluation a exclu les troubles multifactoriels. Dans une population reproductrice, on a appliqué à toutes les générations une valeur de risque $1,2 \cdot 10^{-2}$ par Sv après exposition ou, pour exprimer le risque d'une autre façon, une valeur de $1,2 \cdot 10^{-2}$ par génération pour une exposition continue de 1 Sv par génération. On a estimé que le risque correspondant dans les deux premières générations après l'exposition était de $0,3 \cdot 10^{-2}$ par Sv dans la fraction reproductrice de la population.

110. L'autre méthode appliquée par le Comité pour évaluer le risque génétique est la méthode dite directe. Elle est appliquée aux troubles cliniquement importants qui se manifestent dans la descendance de la première génération des parents exposés. On a estimé $0,2-0,4 \cdot 10^{-2}$ le risque de la fraction reproductrice de la population. Il est rassurant de constater que les deux méthodes différentes d'évaluation du risque génétique aboutissent à des estimations plus ou moins similaires.

111. De nombreuses maladies et de nombreux troubles ont une étiologie complexe et multifactorielle. En outre, il existe un certain nombre de mécanismes connus depuis peu et nouveaux de transmission de maladies héréditaires. Le risque que des rayonnements aient une incidence sur ces maladies multifactorielles et nouvelles est extrêmement hypothétique mais peut être léger. Il faudra poursuivre les recherches pour voir s'il est possible de calculer les estimations du risque pour tous les mécanismes qui peuvent provoquer des maladies dans la descendance des personnes exposées.

IV. SOURCES D'EXPOSITION AUX RAYONNEMENTS

A. Base de comparaisons

112. Les rayonnements auxquels la population humaine est exposée proviennent de sources très diverses. Certaines de ces sources sont des caractéristiques naturelles de l'environnement; d'autres sont le résultat d'activités humaines. Les rayonnements des sources naturelles comprennent le rayonnement cosmique, l'irradiation externe par les radionucléides présents dans la croûte terrestre et l'irradiation interne par des radionucléides inhalés ou ingérés et incorporés dans l'organisme. L'ampleur de ces expositions dépend de la situation géographique et de certaines activités humaines. L'altitude au-dessus du niveau de la mer affecte le débit de dose du rayonnement cosmique; les rayonnements provenant du sol dépendent de la géologie locale; la dose imputable au radon, qui émane du sol et pénètre dans les bâtiments, dépend de la géologie locale, de la construction et de la ventilation des bâtiments. Les expositions au rayonnement cosmique, aux rayons gamma terrestres et à l'inhalation ne varient que faiblement avec le temps, de sorte qu'elles peuvent être considérées comme caractéristiques des rayonnements naturels.

113. Les sources artificielles de rayonnement comprennent les appareils à rayons X, les accélérateurs de particules, les réacteurs utilisés dans la recherche et pour produire de l'énergie nucléaire et les radionucléides utilisés en médecine, dans la recherche et dans des opérations industrielles. Les anciens essais atmosphériques d'engins nucléaires continuent de contribuer à l'exposition partout dans le monde. Les expositions professionnelles sont très répandues, mais n'affectent que des groupes de taille réduite.

114. Certaines sources d'exposition, par exemple les sources naturelles, peuvent être considérées comme persistant à un niveau constant. D'autres encore, par exemple les examens et traitements médicaux et la production nucléaire d'électricité, persistent sur de longues périodes, mais pas nécessairement à un niveau constant. D'autres encore, comme les explosions nucléaires dans l'atmosphère et les accidents, sont des événements isolés ou des séries isolées d'événements. Les sources qui libèrent des matières radioactives dans l'environnement délivrent leurs doses sur de longues périodes, de sorte que les doses annuelles qui en résultent ne donnent pas une mesure satisfaisante de leur impact total.

115. Du fait de ces complexités, il n'y a pas de manière simple de présenter de manière satisfaisante la dose totale à l'homme. Toutefois, il peut être avantageux de chercher une solution de compromis permettant d'envisager toutes les sources sur une base commune, tout en conservant une présentation plus sélective pour les détails de l'exposition à chaque type de source. Une méthode consiste à présenter les doses annuelles moyennes imputables aux diverses sources jusqu'à l'heure actuelle. Ce type de présentation montre l'importance historique des sources jusqu'à ce jour, mais ne donne pas d'indication de la dose future déjà engagée. Le Comité a pallié cette difficulté en utilisant la notion d'engagement de dose, qui tient compte des doses futures engagées du fait de la source considérée. Cependant, ni l'engagement de dose à ce jour, ni la dose collective engagée à ce jour ne donnent une représentation adéquate des doses imputables à des pratiques qui persisteront probablement dans l'avenir. Pour cela, il faut adopter un système quelconque de prévision.

116. La méthode utilisée dans le présent rapport pour comparer les expositions aux rayonnements des diverses sources consiste à présenter la dose collective à

la population mondiale reçue ou engagée a) depuis la fin de 1945 jusqu'à la fin de 1992 (47 ans) pour les événements isolés et b) pour une période de 50 ans au taux actuel de pratique ou d'exposition pour toutes les autres sources, y compris les sources naturelles. Cette méthode suppose que le taux actuel de pratique est raisonnablement caractéristique d'une période de 50 ans : 25 ans avant et 25 ans après le présent. Il est probable que cette hypothèse surestime les doses futures imputables à des pratiques qui ne prennent pas une expansion rapide, car l'amélioration de la technologie et des normes de protection réduira les doses par unité de pratique. Aucune hypothèse n'est nécessaire pour les événements isolés.

117. Le présent chapitre donne un résumé des évaluations du Comité quant aux expositions actuelles du public et des travailleurs du fait des diverses sources de rayonnements. Les annexes scientifiques donnent de plus amples détails.

B. Niveaux d'exposition

1. Expositions aux sources naturelles

118. La valeur moyenne mondiale de la dose effective annuelle due aux sources naturelles est maintenant évaluée à 2,4 mSv, dont environ 1 mSv pour le fond naturel et 1,3 mSv pour le radon. Pour les rayons cosmiques, le débit de dose dépend de l'altitude au-dessus du niveau de la mer et de la latitude : les doses annuelles dans les régions à forte exposition sont environ cinq fois plus élevées que la moyenne. Pour le rayonnement terrestre gamma, le débit de dose dépend de la géologie locale, un niveau élevé étant 10 fois plus élevé que la moyenne; la dose à quelques communautés vivant sur certains types de sables minéraux peut être 100 fois supérieure à la moyenne. Pour les produits de désintégration du radon, la dose dépend de la géologie locale et du mode de construction et d'utilisation des lieux d'habitation; dans certaines régions, la dose est 10 fois supérieure à la moyenne. Du fait de la géologie locale et du mode de construction et de ventilation des bâtiments, les débits de dose des produits de désintégration du radon peuvent parfois être plusieurs centaines de fois supérieurs à la moyenne.

119. Le tableau 1 donne des valeurs moyennes typiques de la dose effective annuelle aux adultes imputable aux principales sources naturelles. L'accumulation de données supplémentaires et des modifications mineures des méthodes d'évaluation n'ont pas empêché les estimations des valeurs annuelles totales de rester presque constantes : 2,0 mSv dans le rapport du Comité pour 1982, 2,4 mSv dans celui pour 1988 et 2,4 mSv dans le tableau 1 ci-après.

120. La dose effective annuelle de 2,4 mSv provenant de sources naturelles se traduit par une dose collective annuelle d'environ 13 millions d'homme-Sv à la population mondiale de 5,3 milliards de personnes.

Tableau 1

Dose effective annuelle aux adultes du fait des sources naturelles

Source	Dose effective annuelle (mSv)	
	Valeur moyenne	Valeur élevée ^a
Rayons cosmiques	0,39	2,0
Rayonnement terrestre gamma	0,46	4,3
Radionucléides dans l'organisme (sauf le radon)	0,23	0,6
Radon et produits de désintégration	1,3	10
Total (arrondi)	2,4	-

^a Valeur représentative pour de vastes régions. On trouve des valeurs locales encore plus élevées.

2. Expositions médicales

121. Les rayonnements sont très utilisés dans des examens et traitements médicaux. Parmi eux, ce sont les procédures de diagnostic de loin les plus courantes. Presque tout le monde connaît les examens par rayons X de la poitrine, du dos, des extrémités ou de l'appareil gastro-intestinal et les radiographies dentaires, qui constituent les applications les plus fréquentes. Cependant, les services radiologiques sont très inégalement répartis dans le monde, la plupart des installations et des services se trouvant dans les pays industrialisés, qui ne comptent qu'un quart de la population mondiale.

122. En se fondant sur une corrélation entre le nombre d'appareils à rayons X et d'examens, d'une part, et le nombre de médecins en activité dans les divers pays, d'autre part, le Comité a évalué les expositions médicales aux rayonnements pour quatre niveaux de services de santé dans le monde, du niveau I dans les pays industrialisés au niveau IV dans les pays les moins développés. Cette classification générale est utile, mais elle cache parfois des variations importantes à l'intérieur des pays.

123. Au fur et à mesure de l'amélioration des soins de santé, le niveau de chaque pays change. La population des diverses catégories de pays évolue donc avec le temps. Entre 1977 et 1990, le plus grand changement a été une augmentation de la population des pays du niveau II, qui est passée de 1,5 milliard à environ 2,6 milliards. Selon les évaluations faites en 1990, la population mondiale se répartit comme suit : pays du niveau I, 1,35 milliard; niveau II, 2,63 milliards; niveau III, 0,85 milliard; niveau IV, 0,46 milliard.

124. Des évaluations représentatives de la fréquence des examens et des doses par examen ont été obtenues à la suite d'une enquête menée par le Comité dans le monde entier. Dans les pays du niveau I, la fréquence annuelle des examens par rayons X, à l'exception des radiographies dentaires, était de 890 par 1 000 habitants. Dans les pays des niveaux II, III et IV, les fréquences par 1 000 habitants étaient respectivement de 120, 70 et 9. Le nombre des examens est étroitement proportionnel au nombre des médecins. Pour chaque niveau, il y avait des différences à l'intérieur des pays et entre eux, la plupart des pays s'écartant de la valeur moyenne de moins d'un facteur trois. L'écart est plus grand dans les pays où le niveau des services de santé est faible.

125. Les doses par examen sont généralement faibles, mais elles varient sensiblement à l'intérieur des pays et entre pays. Les données pour le

niveau II, et particulièrement pour les niveaux III et IV, sont très limitées, mais elles ne révèlent pas de différences sensibles avec les données pour le niveau I. Bien que les doses par examen soient faibles, cette pratique est si répandue qu'elle constitue la principale source d'expositions médicales au rayonnement. Néanmoins, on a également évalué les doses imputables à l'utilisation de produits radiopharmaceutiques et à la radiothérapie.

126. Les doses aux malades sont exprimées en termes de dose effective. Ceci permet de comparer les périodes, les pays, les niveaux de soins de santé, les procédures médicales et les sources d'exposition. Néanmoins, les patients diffèrent de l'ensemble de la population du point de vue de la distribution par âge et par sexe et de l'espérance de vie, si bien que les coefficients théoriques de mortalité examinés dans la section A du chapitre II ne sont que très approximatifs.

127. Lorsqu'on étudie les implications de la dose aux patients, il ne faut surtout pas perdre de vue les bénéfices concomitants. En réduisant la dose individuelle dans un diagnostic, on diminuerait le détriment aux patients, mais on risquerait de diminuer également la quantité ou la qualité des résultats obtenus. En thérapie, une dose trop faible risquerait d'éliminer totalement le bénéfice du traitement. Dans les travaux de dépistage, l'intérêt d'une détection précoce d'une affection doit tenir compte de la possibilité afférente d'une meilleure gestion du cas individuel, car la détection seule n'est pas nécessairement bénéfique. L'utilisation de la dose collective peut constituer une mauvaise base de jugement. Dans de nombreux pays, une augmentation de la dose collective signifiera que l'on dispose de meilleurs services de santé, avec les avantages que cela représente.

128. Des données sur la dose effective annuelle moyenne par patient du fait du diagnostic par rayons X sont disponibles pour 26 pays, dont 21 dans le niveau I, 4 dans le niveau II et 1 dans le niveau III. Dans les pays du niveau I, il y a eu une tendance générale à une diminution de la dose par patient pour la plupart des examens. Une exception notable est la tomographie assistée par ordinateur, où les doses ont eu tendance à augmenter. Dans les pays pour lesquels on dispose de données, les valeurs de la dose effective annuelle par patient sont comprises entre 0,5 et 2,0 mSv. Dans des cas individuels, les valeurs peuvent s'écarter de cette fourchette, et être plus faibles pour les examens des extrémités et du crâne et plus élevées pour les examens du tractus gastro-intestinal.

129. Les valeurs de la dose effective annuelle par habitant sont connues pour 21 pays du niveau I, 5 pays du niveau II et 2 pays du niveau III. Dans les pays du niveau I, les valeurs sont comprises entre 0,3 et 2,2 mSv. Il est difficile de faire des évaluations fiables pour les pays des autres niveaux. Toutefois, pour les niveaux II et III, les valeurs semblent être comprises entre 0,02 et 0,2 mSv. La valeur moyenne pondérée en fonction de la population pour le monde entier est de 1,0 mSv, chiffre identique à celui de 1988. La moyenne mondiale est de 0,3 mSv. Cette valeur est la même que celle qui avait été indiquée en 1988. Une cause d'incertitude de ces valeurs est l'utilisation de la fluoroscopie. Cette procédure se traduit par des doses beaucoup plus élevées que la radiographie, et sa prévalence est à la fois incertaine et variable avec le temps.

130. L'utilisation de produits radiopharmaceutiques pour le diagnostic s'est stabilisée dans les pays du niveau I, mais elle augmente probablement dans les pays des autres niveaux. Il y a eu une évolution sensible de la technologie

dans ce domaine. L'utilisation de radionucléides à longue période dans les pays en développement se traduit par une dose plus forte par examen que dans les pays où l'on dispose de radionucléides à période courte. En particulier, l'utilisation de l'iode-131 a diminué fortement, mais sa contribution à la dose collective reste importante dans les pays industrialisés. La dose effective annuelle par habitant ne représente toujours qu'environ 10 % de la dose imputable à l'utilisation des rayons X pour le diagnostic. Pour les pays du niveau I, la dose effective annuelle par habitant est d'environ 0,09 mSv. Pour les pays des autres niveaux, elle est plus faible d'un ordre de grandeur. Pour le monde entier, la dose effective annuelle par habitant imputable au diagnostic en médecine nucléaire est de 0,03 mSv.

131. La dose effective annuelle par habitant pour toutes les utilisations des rayonnements à des fins diagnostiques est évaluée à 1,0 mSv dans les pays du niveau I et à 0,3 mSv en moyenne mondiale. La dose effective collective annuelle imputable aux expositions médicales dans le monde entier est évaluée à $1,8 \cdot 10^6$ homme-Sv. Elle constitue la plus forte exposition à des sources artificielles et correspond à environ un septième de la dose collective annuelle due au fond naturel dans le monde entier.

132. La dose au patient qui subit une radiothérapie est beaucoup plus élevée que la dose dans le cas du diagnostic, mais le nombre des patients est plus faible. Il est difficile de définir une quantité appropriée pour exprimer la dose à l'extérieur de l'organe cible. Le Comité a utilisé une quantité analogue à la dose effective, mais ne tenant pas compte de la dose au tissu cible. À toutes fins utiles, cette quantité peut être considérée comme étant la même que la dose effective.

133. Avec cette simplification, la dose effective collective annuelle pour le monde entier du fait de la thérapie est d'environ $1,5 \cdot 10^6$ homme-Sv, c'est-à-dire à peu près la même que la dose due au diagnostic. Toutefois, la comparaison des doses en diagnostic et en thérapie peut ne pas donner une image exacte du détriment relatif. La différence entre les distributions par groupes d'âge ne semble pas être très marquée, mais l'espérance de vie ultérieure est probablement moindre pour les patients subissant une thérapie. Ceci donne moins de temps aux effets tardifs pour se manifester et réduit donc le détriment relatif.

134. Il faut s'attendre à une augmentation des expositions médicales aux rayonnements à mesure que les populations deviennent plus âgées et plus urbanisées et que les services radiologiques se généralisent partout dans le monde. En revanche, on a tendance à diminuer les doses par examen et à avoir de plus en plus recours à des méthodes de substitution, telles que la résonance magnétique et les ultrasons. On observera de grandes différences dans ces tendances entre les pays des différents niveaux de service de santé.

3. Expositions dues aux explosions nucléaires et à la production d'armes nucléaires

135. Entre 1945 et 1980, des explosions nucléaires dans l'atmosphère ont été effectuées en divers lieux, mais principalement dans l'hémisphère Nord, entre 1945 et 1980. Les périodes d'essais les plus intenses ont été 1952-1958 et 1961-1962. Au total, on a procédé à 520 essais, avec un rendement total de fission et de fusion de 545 Mt.

136. Depuis la signature à Moscou, le 5 août 1963, du Traité d'interdiction des essais nucléaires dans l'atmosphère, l'espace extraterrestre et sous l'eau, la plupart des explosions nucléaires ont été souterraines. Par suite d'un défaut de confinement, quelques produits de fission gazeux ont été libérés lors de quelques essais souterrains, mais les données disponibles sont insuffisantes pour permettre une évaluation de l'engagement de dose qui en résulte. Le rendement explosif total des essais souterrains est estimé à 82 Mt, valeur beaucoup plus faible que celle des essais atmosphériques antérieurs. En outre, les débris souterrains sont certes une source potentielle d'exposition humaine, surtout localement, mais ils sont généralement bien confinés. Les essais atmosphériques passés restent donc la principale source d'exposition de la population mondiale du fait des essais d'engins nucléaires.

137. La dose effective collective totale engagée par les essais d'engins nucléaires à ce jour est d'environ $3 \cdot 10^7$ homme-Sv. Environ $7 \cdot 10^6$ homme-Sv auront été délivrés en l'an 2200. Le reste, dû au carbone 14, sera délivré au cours des 10 000 ans à venir. Une autre manière d'exprimer ces conclusions consiste à utiliser l'intégrale sur le temps du débit de dose moyen à la population mondiale, l'engagement de dose. L'engagement de dose jusqu'à l'an 2200 du fait des essais dans l'atmosphère est d'environ 1,4 mSv; pour l'ensemble des époques, il est de 3,7 mSv. Ces deux valeurs sont du même ordre de grandeur que la dose effective imputable à une seule année d'exposition aux sources naturelles. La fraction de l'engagement de dose qui sera délivrée avant 2200 (38 %) n'est pas la même que la fraction de la dose collective correspondante (23 %), parce que la population mondiale augmentera sans doute de 3,2 milliards à l'époque des principaux programmes d'essais nucléaires à 10 milliards pendant la plus grande partie des 10 000 années à venir.

138. Ces évaluations pour le monde entier tiennent compte de la contribution des doses reçues par les individus au voisinage des sites utilisés pour les essais dans l'atmosphère. Bien que cette contribution soit faible en termes mondiaux, certaines doses locales ont été importantes. Les doses à la thyroïde des enfants au voisinage du site d'essais du Nevada, aux États-Unis, peuvent s'être élevées à 1 Gy. Des doses à la thyroïde analogues, mais quelque peu plus importantes, ont été observées entre 1949 et 1962 dans des villages à proximité du site d'essais de Semipalatinsk, dans l'ex-URSS. Quelques doses près du site d'essais du Pacifique, aux États-Unis, ont également été élevées, essentiellement parce que le vent a changé de direction après un essai thermonucléaire. La contamination du sol au voisinage de Maralinga, en Australie, site des essais nucléaires britanniques, a été suffisante pour que l'on ait imposé des restrictions à l'accès ultérieur à ce site. Sans nouvelle décontamination, une occupation continue sans restriction pourrait provoquer des doses effectives annuelles de plusieurs millisievert dans deux régions, avec des valeurs allant jusqu'à 500 mSv dans de petites zones au voisinage immédiat des sites d'essais. La dose effective collective locale et régionale pour l'ensemble des séries d'essais a été d'environ 700 homme-Sv.

139. Les activités industrielles nécessaires pour alimenter le stock mondial d'armes nucléaires constituent également une source d'exposition. Les activités initiales sont l'extraction et l'affinage de l'uranium. L'uranium est ensuite enrichi, soit fortement comme élément d'armes, soit seulement comme combustible pour les réacteurs de production de plutonium et de tritium. L'ampleur de ces activités n'est pas connue du public et doit donc être évaluée indirectement. Les engagements de dose qui en résultent sont ensuite estimés par comparaison avec les données relatives à la production nucléaire d'électricité, qui sont plus facilement disponibles. La dose effective collective aux populations

locales et régionales engagée du fait de ces opérations est évaluée à quelque 1 000 homme-Sv. La dose collective globale sera supérieure d'un facteur compris entre 10 et 100. Même en posant qu'elle est égale à 105 homme-Sv, elle ne représente qu'une petite fraction de la dose effective collective engagée par les programmes d'essais nucléaires.

140. Comme dans le cas des essais d'engins nucléaires, certaines doses locales ont été importantes. On évalue actuellement les doses à proximité de l'usine de production de plutonium de Hanford, dans l'État de Washington, aux États-Unis. Les résultats préliminaires donnent à penser que des doses à la thyroïde peuvent s'être élevées jusqu'à 10 Gy au cours des années 40. La libération dans l'environnement des déchets du retraitement du combustible irradié dans l'usine militaire soviétique de Kyshtym, dans l'Oural, s'est traduite par des doses effectives d'environ 1 Sv sur les bords de la rivière jusqu'à 30 km de l'usine au cours de quelques années au début des années 50.

4. Expositions dues à la production nucléaire d'électricité

141. La production d'électricité grâce à des réacteurs nucléaires n'a pas cessé d'augmenter depuis ses débuts, au cours des années 50; toutefois, le taux d'augmentation est maintenant plus faible que pour les autres moyens de production. En 1989, la production nucléaire d'électricité s'est élevée à 212 GW a, représentant 17 % de la production mondiale d'électricité pendant la même année. La production nucléaire totale d'électricité depuis les années 50 jusqu'à 1990 se situe à un peu moins de 2 000 GW a.

142. Comme dans de précédents rapports du Comité, la dose effective collective engagée par la production nucléaire de 1 GW a d'électricité a été évaluée pour l'ensemble du cycle du combustible : extraction et affinage, enrichissement, fabrication du combustible, exploitation des réacteurs, retraitement du combustible et évacuation des déchets. On n'a pas encore tenu compte spécifiquement des opérations liées à la mise hors service de centrales, en partie parce que l'on ne possède que des données limitées à ce sujet et en partie parce qu'il est déjà évident que leur contribution sera probablement très faible.

143. Des informations détaillées ont été obtenues au sujet des libérations de radionucléides dans l'environnement au cours des opérations normales pour la plupart des principales installations dans le monde. Sur la base de ces informations, le Comité a évalué les libérations normalisées par unité d'énergie électrique produite. Les engagements de dose effective collective par unité d'énergie produite ont ensuite été évalués à l'aide des modèles environnementaux généralisés mis au point par le Comité dans de précédents rapports. Des évaluations distinctes ont été faites pour les composantes normalisées résultant des expositions des populations locales et régionales, d'une part, et des expositions aux radionucléides dispersés autour du globe, d'autre part. Le tableau 2 résume les principales contributions. Ces doses collectives engagées ont été tronquées à 10 000 ans, à cause des grandes incertitudes qui entachent les prédictions à plus long terme.

Tableau 2

Doses collectives normalisées dues à la production
nucléaire d'électricité

Source	Dose effective collective engagée par unité d'électricité produite [homme-Sv (GW a) ⁻¹]
Populations locales et régionales	
Extraction, affinage et résidus	1,5
Fabrication du combustible	0,003
Exploitation des réacteurs	1,3
Retraitement du combustible	0,25
Transports	0,1
Total (arrondi)	3
Population mondiale (y compris l'évacuation des déchets solides)	
Résidus d'extraction et d'affinage (libérations sur 10 000 ans)	150
Évacuation des déchets solides des réacteurs	0,5
Radionucléides dispersés autour du globe (principalement carbone-14)	50
Total (arrondi)	200

144. La valeur de 3 homme-Sv (GW a)⁻¹ pour la dose collective normalisée aux populations locales et régionales, engagée par unité d'électricité produite, est légèrement plus faible que la valeur indiquée dans les rapports précédents. Les diminutions ont porté essentiellement sur l'exploitation des réacteurs et le retraitement du combustible, avec une légère augmentation des évaluations pour l'extraction et l'affinage. La valeur actuelle n'est donc pas représentative de la totalité de la période de production nucléaire d'électricité, la dose normalisée au début de la période étant quelque peu plus élevée que la moyenne. La dose collective totale engagée par les effluents du cycle du combustible nucléaire jusqu'à la fin de 1989 est évaluée à un peu plus de 10 000 homme-Sv. La dose collective engagée par les radionucléides dispersés autour du globe et par les déchets solides est incertaine, étant donné qu'elle dépend des futures pratiques de gestion des déchets et de l'évolution de la population mondiale au cours des 10 000 prochaines années. Si l'on retient la valeur de 200 homme Sv (GW a)⁻¹ indiquée dans le tableau 2, on peut conclure que la production nucléaire totale d'électricité, soit 2 000 GW a, a engagé une dose effective collective de 400 000 homme-Sv.

145. Si le taux actuel de production nucléaire d'électricité et les valeurs normalisées données dans le tableau 2 sont représentatifs de la période de 50 ans centrée sur le présent, la dose effective collective due pendant cette période à la production nucléaire d'électricité est d'environ 2 10⁶ homme-Sv.

146. Les doses aux individus imputables à la production nucléaire d'énergie électrique sont très différentes les unes des autres, même pour les populations au voisinage de centrales analogues. On a fait quelques évaluations des doses maximales pour des modèles réalistes de sites. Pour les principaux types de centrales nucléaires, les doses effectives annuelles aux membres de la

population les plus exposés sont comprises entre 1 et 20 μSv . Les valeurs annuelles correspondantes pour les grandes installations de retraitement du combustible sont comprises entre 200 et 500 μSv .

5. Expositions dues aux accidents graves

147. Comme dans toutes les activités humaines, il y a des accidents du travail. L'exposition des patients qui subissent des irradiations diagnostiques ou thérapeutiques risque aussi d'être modifiée par les défaillances du matériel ou des procédures. Les doses résultant d'incidents sur les lieux de travail sont prises en compte dans les résultats de la surveillance radiologique courante. Certains accidents du travail ou certains accidents médicaux ont de graves conséquences pour leurs victimes. Ils sont assez fréquents (il y en a peut-être quelques centaines par an dans le monde), mais la probabilité qu'un membre du public en soit victime est très faible. La présente section n'examinera que les accidents graves qui touchent le public.

148. Plusieurs accidents sont survenus lors de la production et du transport d'engins nucléaires. Les accidents de transport ont provoqué une contamination locale par le plutonium. La dose collective engagée du fait de ces accidents est faible. C'est lors de l'accident survenu à Palomares (Espagne) qu'a été engagée la plus forte dose effective; environ 200 mSv. D'autres accidents sur terre et la perte d'engins nucléaires en mer n'ont entraîné que des doses négligeables pour les populations.

149. Les deux accidents les plus graves lors de la production d'engins nucléaires ont eu lieu à Kyshtym, dans le sud de l'Oural, en septembre 1957, et à Windscale, près de Sellafield, sur la côte nord-ouest d'Angleterre, en octobre de la même année.

150. L'accident de Kyshtym a été une explosion chimique, due à une défaillance du système de refroidissement, dans un réservoir de stockage de déchets de haute activité de produits de fission. Les principaux produits de fission libérés étaient des radio-isotopes du cérium, du zirconium, du niobium et du strontium. Les doses étaient imputables aux produits de fission déposés sur le sol et au strontium entrant dans la chaîne alimentaire. La dose collective a été partagée à peu près également entre les personnes qui ont été évacuées de la zone fortement contaminée (environ 10 000 personnes) et les personnes qui sont restées dans les zones moins contaminées (environ 260 000 personnes). La dose collective totale sur 30 ans a été évaluée à environ 2 500 homme-Sv. Les doses individuelles les plus élevées concernaient des personnes évacuées peu après l'accident. La dose effective moyenne dans ce groupe de 1 150 personnes a été d'environ 500 mSv.

151. L'accident de Windscale a été un incendie dans le coeur à uranium naturel et graphite d'un réacteur à refroidissement par air, conçu essentiellement pour la production de plutonium à des fins militaires. Les principales matières libérées étaient des radio-isotopes du xénon, de l'iode, du césium et du polonium. La principale voie d'incorporation a été l'ingestion de lait, qui a été contrôlée près du lieu de l'accident. Plus loin, la consommation non contrôlée de lait et l'inhalation ont été des sources importantes d'exposition, ^{131}I et ^{210}Po étant les deux contributeurs principaux. La dose effective collective totale en Europe, y compris le Royaume-Uni, a été d'environ 2 000 homme-Sv. Les doses individuelles les plus élevées ont été délivrées à la thyroïde d'enfants vivant au voisinage du site; elles allaient jusqu'à environ 100 mGy.

152. Quelques accidents sont survenus dans les réacteurs de centrales nucléaires, les plus importants étant ceux de Three Mile Island (États-Unis) et de Tchernobyl (ex-URSS). A Three Mile Island, le coeur du réacteur a été sérieusement endommagé, mais la plupart des produits de fission ont été retenus dans l'enceinte de confinement. L'engagement de dose effective collective qui en a résulté n'a pas été supérieur à environ 40 homme-Sv. Les doses individuelles dans la population ont été faibles, la plus élevée ayant été légèrement inférieure à 1 mSv.

153. L'accident de Tchernobyl a été traité de manière détaillée dans le rapport de 1988 du Comité (III.A.8). L'explosion et l'inflammation ultérieure du graphite ont libéré une fraction importante des matières contenues dans le coeur du réacteur. Les doses aux individus sont très variables, quelques membres de la population évacuée ayant reçu des doses effectives proches de 0,5 Sv. La valeur moyenne de la dose effective annuelle dans les zones étroitement contrôlées entourant la zone évacuée est tombée d'environ 40 mSv au cours de l'année suivant l'accident à moins de 10 mSv pour chaque année suivante jusqu'en 1989.

154. Une analyse internationale de la situation dans les zones entourant la zone évacuée a été faite en 1990. Ses résultats ont corroboré les évaluations antérieures et on a constaté que l'état de santé de la population cette année-là était comparable à celui de la population de villages voisins non contaminés.

155. Des sources scellées à usage industriel ou médical ont parfois été perdues ou endommagées, et des membres de la population en ont souffert. Quatre accidents graves de ce genre ont eu lieu depuis 1982. Au Mexique, en 1983, une source au cobalt-60 dont l'emploi en téléthérapie n'avait pas été autorisé a été vendue à un ferrailleur. En plus d'une vaste contamination de produits sidérurgiques au Mexique et aux États-Unis, environ 1 000 personnes ont été exposées à des niveaux importants de rayonnements, avec des doses effectives allant jusqu'à environ 250 mSv. Environ 80 personnes ont reçu des doses plus élevées, jusqu'à 3 Sv, et sept ont reçu des doses comprises entre 3 et 7 Sv. Il n'y a eu aucun décès.

156. Au Maroc, en 1984, huit membres d'une famille sont décédés après que l'un d'eux eut trouvé et conservé à domicile une source scellée utilisée en radiographie industrielle, qui contenait de l'iridium-192. Les doses effectives étaient comprises entre 8 et 25 Sv. A Goiania (Brésil), en 1987, une source de téléthérapie au césium-137 a été retirée de son logement et cassée. Des doses élevées ont été reçues par des individus, soit directement, soit du fait d'une contamination localisée. On a relevé des doses aux individus allant jusqu'à 5 Sv. Il a fallu hospitaliser 54 personnes, dont quatre sont décédées. Dans la province de Shanxi (Chine), en 1992, une source au cobalt-60 a été perdue et ramassée par un individu. Trois membres de sa famille sont morts de surexposition. En 1993, un accident a eu lieu près de Tamsk, en Fédération de Russie. Les informations relatives à cet accident n'ont pas encore été entièrement évaluées mais il semble que les expositions ont été très faibles et que peu de membres du public ont été irradiés.

6. Expositions professionnelles

157. Les expositions professionnelles aux rayonnements sont subies par diverses catégories de travailleurs, qui sont en contact avec des matières radioactives ou sont exposés à des sources artificielles ou à des sources naturelles accrues. Le Comité a mené une enquête dans divers pays du monde, afin d'obtenir des

données permettant un examen d'ensemble des expositions professionnelles aux rayonnements.

158. De nombreux travailleurs dans des activités impliquant une exposition à des sources de rayonnements ou à des matières radioactives font l'objet d'un contrôle individuel. Une exception majeure est le nombreux personnel exposé à des niveaux accrus de rayonnements naturels, par exemple dans certains domaines des industries extractives. La principale raison du contrôle de l'exposition aux rayonnements dans les lieux de travail est de fournir une base pour le contrôle des expositions et d'assurer le respect des limites réglementaires et des politiques de gestion. Ces deux objectifs vont plus loin que le simple respect des limites de dose et de satisfaire certaines règles et faire la preuve que la protection est optimale. Inévitablement, la conception et l'interprétation des programmes de contrôle sont fonction des besoins locaux. On a intérêt à relever ces objectifs pour permettre les comparaisons entre des organismes divers, si cela ne représente pas trop de difficultés. Ce faisant, on aiderait beaucoup le Comité dans sa tâche de compilation et de comparaison des données.

159. Pour la plupart des travailleurs exposés à des sources de rayonnements ou à des matières radioactives, les principales sources d'exposition sont externes. Les doses dues à des sources internes sont généralement insignifiantes, à l'exception des doses imputables au radon naturellement présent dans tous les lieux de travail. En outre, il est beaucoup plus facile de contrôler les expositions externes que les expositions internes. En conséquence, de nombreux travailleurs sont contrôlés pour les expositions externes, même si on s'attend que leurs doses soient faibles, mais le contrôle des expositions internes n'est effectué que lorsque c'est réellement nécessaire. Néanmoins, il se peut que certains endroits où il y a une radioexposition professionnelle ne fassent pas l'objet d'une surveillance suffisante. On estime que l'importance de la radioexposition professionnelle dans les activités médicales et la façon dont elle est enregistrée sont satisfaisantes dans les grandes installations médicales mais risquent de l'être moins dans les petites.

160. Il n'est pas possible de faire des mesures directes de la dose effective aux travailleurs. Dans la plupart des cas de contrôle de l'exposition externe, les résultats donnés par de petits dosimètres individuels sont généralement considérés comme une mesure adéquate de la dose effective. Les doses dues à des sources internes sont évaluées à la suite d'un certain nombre de mesures, notamment la quantité de matières radioactives excrétée ou retenue par l'organisme et la concentration de matières radioactives dans l'atmosphère des lieux de travail. Les évaluations dépendent de modèles de la répartition temporelle des absorptions et des processus de transfert et de rétention dans l'organisme. Des incertitudes importantes sont inévitables.

161. Il est quelque peu difficile de présenter des données sur la dose individuelle typique, du fait que les politiques de distribution de dosimètres aux travailleurs diffèrent. En particulier, la distribution générale de dosimètres aux travailleurs dont l'exposition sera probablement faible diminue artificiellement la valeur moyenne enregistrée pour le personnel exposé. Le Comité a utilisé dans certains cas la dose moyenne par travailleur exposé à une dose mesurable, évitant ainsi la distorsion introduite par ceux qui sont contrôlés, mais reçoivent des doses insignifiantes. Tous les pays ne fournissent pas leurs informations sous une forme permettant d'évaluer cette quantité, de sorte qu'elle ne peut pas être utilisée dans un résumé d'ensemble des données. À certaines fins, la dose collective est une quantité plus

satisfaisante, car elle est peu modifiée par l'inclusion d'un grand nombre de doses insignifiantes individuellement.

162. Les doses annuelles enregistrées pour les travailleurs contrôlés diffèrent fortement selon les activités, ainsi qu'entre pays pour la même activité. Les données détaillées obtenues à la suite de l'enquête du Comité ont permis de faire des comparaisons pour des périodes quinquennales entre 1975 et 1989. Le résumé ci-après porte essentiellement sur la période quinquennale la plus récente, avec des commentaires sur les tendances au cours des périodes précédentes. Les valeurs moyennes mondiales des doses annuelles reçues par les travailleurs contrôlés et les doses collectives correspondantes pour 1985-1989 sont présentées dans le tableau 2.

163. Les travailleurs dans des activités impliquant une exposition fortuite à des sources naturelles, telles que l'extraction autre que l'uranium, ne sont généralement pas contrôlés et les doses qu'ils reçoivent ne figurent pas dans le tableau 3. Les principales activités dans cette catégorie relèvent de l'aviation et de l'extraction minière. La dose effective annuelle aux équipages d'avions se situe entre 2 et 3 mSv, avec des valeurs plus élevées dans certains avions supersoniques. Dans les industries extractives, les doses effectives annuelles individuelles sont de l'ordre de 1-2 mSv dans les mines de charbon et de 1-10 mSv dans d'autres mines. La dose collective annuelle à ces travailleurs du fait de leur activité professionnelle est évaluée à 8 600 homme-Sv. Toutefois, cette évaluation est entachée d'une forte incertitude du fait que les données concernant le contrôle de ces travailleurs sont très limitées.

164. Les évaluations résumées dans le tableau 3 diffèrent à certains égards de celles qui ont été indiquées dans des rapports antérieurs. Les modifications sont dues essentiellement au fait que l'on dispose maintenant de meilleures données de base. La plus forte modification concerne les évaluations des doses dues aux applications médicales, dont la plus grande partie est imputable à des rayonnements ayant un faible pouvoir de pénétration. Les dosimètres individuels portés à la surface du corps surestiment la dose effective, notamment dans le cas très courant où le corps est protégé par des écrans fixes et des tabliers spéciaux. L'évaluation actuelle de la dose collective est cinq fois plus faible que la précédente, et il est possible qu'elle soit encore deux fois trop élevée.

165. Dans l'industrie nucléaire, la dose collective annuelle moyenne n'a pas beaucoup évolué au cours des 15 dernières années bien que la production d'électricité ait triplé et le nombre de travailleurs doublé au cours de cette période. Par unité d'électricité produite, la dose collective a diminué de 50 % et la dose individuelle de 30 %. En moyenne, les doses individuelles les plus fortes sont celles des travailleurs des opérations d'extraction et d'enrichissement. Les réductions de la dose individuelle reçue par les travailleurs des réacteurs sont dues à la fois à un perfectionnement des pratiques et à des modifications des installations dans les années 80. On peut s'attendre à d'autres améliorations avec la mise en service de nouvelles installations.

Tableau 3

Valeurs moyennes mondiales des expositions annuelles des
travailleurs contrôlés, 1985-1989

Activité	Dose effective collective annuelle ^a (homme-Sv)	Dose effective annuelle par travailleur contrôlé (mSv)
----------	---	---

Cycle du combustible nucléaire

Extraction	1 200	4,4
Affinage	120	6,3
Enrichissement	0,4	0,08
Fabrication du combustible	22	0,8
Exploitation des réacteurs	1 100	2,5
Retraitement du combustible	36	3,0
Recherche	100	0,8
Total (arrondi)	2 500	2,9
Autres activités		
Applications industrielles	510	0,9
Défense	250	0,7
Applications médicales	1 000	0,5
Total (arrondi)	1 800	0,6
Toutes activités		
Total général (arrondi)	4 300	1,1

^a Les doses dues à des expositions fortuites à des sources naturelles ne sont pas comprises. La dose collective annuelle due à ces sources naturelles est évaluée à environ 8 600 homme-Sv, en grande partie du fait de l'extraction autre que l'uranium. Environ la moitié de cette dose est due à l'extraction du charbon.

166. Aussi bien les doses individuelles que les doses collectives dans les activités industrielles en général ont diminué environ de moitié. Étant donné que le nombre des travailleurs contrôlés n'a été que peu modifié, il s'agit bien d'une amélioration d'ensemble. Dans les activités touchant la défense, les doses individuelles et les doses collectives ont toutes deux diminué, essentiellement du fait des améliorations dans l'exploitation et l'entretien des navires à propulsion nucléaire.

167. Compte tenu de la surestimation faite dans des rapports antérieurs, les expositions professionnelles en médecine ne révèlent aucune tendance particulière en ce qui concerne la dose collective. On a observé une diminution de la dose individuelle moyenne, qui s'explique en partie par l'augmentation du nombre des travailleurs contrôlés.

168. Il est rare que des travailleurs subissent une exposition importante aux rayonnements à la suite d'accidents. Les incidents mineurs, qui entraînent des expositions non prévues mais sans dommage direct, sont plus fréquents; mais la manière dont on fait état de ces incidents varie fortement d'un lieu à un autre. Le Comité a reçu des renseignements concernant environ 100 accidents suivis de décès ou pouvant provoquer des effets déterministes parmi les travailleurs dans la période écoulée depuis 1975. La liste est presque certainement incomplète. L'accident de Tchernobyl a été de loin le plus grave : il a provoqué 28 décès dus aux rayonnements. Les doses reçues par environ 200 travailleurs ont été suffisamment élevées pour avoir des effets déterministes. On a fait également état de trois décès imputables aux rayonnements dans d'autres accidents. Les accidents impliquant des membres de la population sont mentionnés plus haut dans la section 5.

169. La dose collective due à des expositions au cours d'accidents mineurs est mentionnée dans les rapports courants sur l'exposition professionnelle. La dose collective due à des accidents graves n'est pas facile à évaluer, mais elle est certainement faible comparée à la valeur totale des doses collectives imputables à l'exposition professionnelle. Un élément de la dose collective qui n'a pas

encore fait l'objet d'une évaluation quantitative avec les autres expositions professionnelles est celui imputable aux travaux d'urgence entrepris pour rétablir le confinement du réacteur endommagé à Tchernobyl. Bien que ces travaux soient le résultat direct d'un accident, il ne s'agit pas d'une exposition accidentelle. Environ 247 000 travailleurs ont été impliqués. La dose moyenne résultant de l'exposition externe a été estimée à 0,12 Sv, ce qui abouti à une dose collective d'environ 30 000 homme-Sv. Les doses dues à la radioexposition interne ont varié au cours des travaux, mais ont été égales à environ 10 % des doses dues à l'exposition externe.

7. Résumé des données disponibles

170. Le tableau 4 donne les doses effectives collectives typiques engagées par 50 ans de pratique pour toutes les sources importantes d'exposition et pour les événements isolés depuis la fin de 1945. Les bases de calcul des valeurs indiquées dans ce tableau sont données dans les sections précédentes, qui elles-mêmes résument les évaluations détaillées présentées dans les annexes scientifiques.

171. Ce tableau montre l'importance relative des sources de rayonnements en termes des doses collectives qui en résultent. De loin la plus importante est l'ensemble du rayonnement naturel. Toutes les populations du monde sont exposées aux rayons cosmiques et à la radioactivité des radio-isotopes naturels du potassium, de l'uranium, du radium, du radon, du thorium, etc., présents dans le sol, l'eau, les aliments et l'organisme. La deuxième source par ordre d'importance est l'utilisation médicale des rayons X et de produits radiopharmaceutiques aux fins de diagnostic et de traitement. On a indiqué les doses dues au diagnostic et au traitement, bien qu'elles ne soient pas strictement comparables quant au détriment qui en résulte.

172. Les expositions dues aux essais atmosphériques d'engins nucléaires ont diminué. Il n'y a pas eu de nouveaux essais depuis 1980. La production nucléaire d'électricité, les accidents et diverses expositions professionnelles sont insignifiants en termes de dose collective, mais les doses aux individus directement impliqués sont néanmoins importantes du point de vue de la protection radiologique.

173. À l'exception des doses imputables aux sources naturelles, la variation des doses individuelles dans le temps et d'un lieu à un autre ne permet pas de résumer de manière cohérente les doses individuelles. Cependant, on peut donner quelques indications.

174. La valeur moyenne de la dose effective annuelle due au fond naturel est 2,4 mSv, avec des valeurs élevées pouvant aller jusqu'à 10 ou 20 mSv. Les procédures médicales dans les pays avancés se traduisent par une dose effective annuelle à l'individu moyen comprise entre 1 et 2 mSv, dont environ les deux tiers pour le diagnostic. Dans le rapport de 1977, le Comité a donné les doses annuelles moyennes aux individus au milieu des années 70 du fait des essais

nucléaires dans l'atmosphère. À cette époque, la plupart des radionucléides à période courte s'étaient désintégrés. Les doses effectives annuelles étaient d'environ 5 μSv . Les doses effectives annuelles lors de la période d'essais la plus intense étaient probablement comprises entre 100 et 200 μSv dans l'hémisphère Nord. Les doses effectives annuelles aux populations les plus exposées au voisinage des centrales nucléaires sont de l'ordre de 1-200 μSv . Les doses effectives annuelles aux travailleurs soumis à un contrôle sont actuellement de l'ordre de 1-10 mSv.

Tableau 4

Dose collective engagée à la population mondiale par une période de 50 ans pour les pratiques chroniques, ou entre la fin de 1945 et la fin de 1992 pour les événements isolés

Source	Base de la dose engagée	Dose effective collective (10^6 homme-Sv)
Sources naturelles	Taux annuel actuel pendant 50 ans	650
Procédures médicales		
Diagnostic	Taux annuel actuel pendant 50 ans	90
Thérapie		75
Essais d'armes nucléaires dans l'atmosphère	Dose imputable à tous les essais passés	30
Production nucléaire d'électricité	Dose à ce jour	0,4
	Taux actuel pendant 50 ans	2
Accidents graves	Accidents à ce jour	0,6
Exposition professionnelle		
Médecine		0,05
Électricité nucléaire		0,12
Industrie	Taux actuel pendant 50 ans	0,03
Défense		0,01
Extraction minière (sauf uranium)		0,4
Total (toutes occupations)		0,6

V. LA PERCEPTION DES RISQUES RADIOLOGIQUES

175. Le mot "risque" a diverses significations. Il est souvent utilisé pour indiquer la possibilité d'une perte ou d'un danger, comme dans les expressions "assurance tous risques" et "risque de verglas". Dans un contexte technique, il est utilisé dans un sens quantitatif, mais sans qu'il y ait accord général sur sa définition. Parfois, il évoque la probabilité d'un résultat fâcheux bien défini, mais il implique souvent une combinaison de cette probabilité et d'un certain degré de gravité de ce résultat. Ces différents sens provoquent une certaine confusion parmi les spécialistes, mais il est probable qu'ils ont peu d'influence sur l'attitude du grand public. Pour le public, le mot risque est surtout descriptif, avec une notion de gravité. Certains risques paraissent pires que d'autres, en partie parce que l'on pense que le résultat est plus probable et en partie parce que ce résultat, s'il survient, est plus fâcheux. On n'a guère cherché à faire une distinction formelle entre ces divers aspects ou à les combiner pour avoir une acception moins intuitive. De nombreux facteurs influencent la conception d'un risque par le public : son origine, sa nature, la mesure dans laquelle il fait partie de la vie quotidienne, le degré de choix et de contrôle à la portée des individus, la confiance dans le créateur et le contrôleur du risque, etc. Inévitablement, tout examen quantitatif des risques implique à la fois des jugements scientifiques et des appréciations sociales.

176. Dans ces conditions, il n'y a aucune raison d'espérer que l'attitude du public à l'égard d'un risque sera la même que celle de ceux qui établissent des évaluations quantitatives des risques, déterminent leur importance et les contrôlent. Le Comité a pour tâche de faire des évaluations quantitatives du risque associé aux rayonnements ionisants. Les effets de la radio-exposition ont été exprimés en termes de probabilité de leur incidence, durée de vie perdue dans le cas de conséquences mortelles et description de la gravité de conséquences non mortelles. Il n'appartient pas au Comité de porter des jugements sur l'importance relative de différentes sortes de risques pour la société, ni de traiter du contrôle des risques. En conséquence, le Comité s'efforce de présenter ses conclusions de manière neutre; mais il a pensé qu'il était souhaitable de tenir compte dans une certaine mesure des différences probables dans la manière dont ses conclusions seraient perçues par les non-spécialistes.

177. La conclusion la plus importante est qu'il n'y a aucune uniformité dans l'évaluation, la comparaison ou l'acceptation des risques par les individus ou les sociétés. Des progrès notables ont été accomplis, surtout au cours des 20 dernières années, dans l'établissement d'une présentation structurée des facteurs qui influencent les perceptions et dans la répartition de ces facteurs en plusieurs classes. Certains facteurs ont trait aux caractéristiques personnelles et à l'expérience des individus; d'autres sont associés aux caractéristiques de la société dans laquelle vivent les individus. Beaucoup dépend du degré de connaissance de la source et du caractère des risques en question.

178. Dans toutes les occupations et activités impliquant des rayonnements, les risques et leur perception ont été reconnus comme des questions majeures. La difficulté dans la gestion des risques a été de répondre aux préoccupations des individus, des communautés et de la société. Un principe fondamental a été de justifier des activités ou des pratiques en fonction des bénéfices que l'on en retire, et de réduire les expositions dans toute la mesure raisonnablement

possible. Les opinions quant à l'application de ce principe dépendent fortement des diverses perceptions.

179. On se heurte à des difficultés majeures lorsqu'on veut communiquer à la population des renseignements sur les rayonnements. Même dans des pays technologiquement très avancés, beaucoup de personnes ignorent pratiquement tout des rayonnements et de la radioactivité. La plupart des personnes qui ont quelques connaissances sur les rayonnements les associent aux accidents, aux armes nucléaires, à la retombée et au cancer. Très peu de membres de la population associent rayonnements et diagnostic médical ou sont au courant de l'exposition normale aux sources naturelles de rayonnements.

180. Le Comité reconnaît que de nombreux facteurs extérieurs influent sur la manière dont ses constatations sont considérées. Le souci général au sujet des niveaux et des effets des rayonnements est influencé davantage par les mérites évidents et les implications sociales d'une source de rayonnements que par l'ampleur des expositions et des risques qui en résultent. Néanmoins, le Comité reconnaît l'obligation qui lui incombe d'évaluer les expositions aux rayonnements et de présenter des évaluations des risques qui soient bien établies, conséquentes et objectives. L'information doit être fiable et communiquée clairement si l'on veut qu'elle contribue à la prise de décisions positives pour l'ensemble de la société.

VI. BILAN ET PERSPECTIVES

A. Niveaux d'exposition

181. L'amélioration des évaluations faites par le Comité des niveaux d'exposition dans le monde suit celle de la communication des données. De façon très générale, on peut conclure que l'amélioration des procédures fait diminuer l'exposition par l'unité de pratique dans des proportions suffisantes pour compenser le développement des pratiques.

182. Certaines sources d'exposition conservent un niveau constant. Certaines continuent d'exister pendant longtemps à un niveau qui ne reste pas nécessairement constant. D'autres sources sont dues à des événements ponctuels ou des séries ponctuelles d'événements (essais d'armements). Des sources qui libèrent des matières radioactives dans l'environnement engagent des doses pendant des périodes prolongées si bien que les doses annuelles qui en résultent ne permettent pas de mesurer de façon satisfaisante toutes les conséquences.

183. Le rapport indique la dose collective à la population mondiale reçue ou engagée de la fin de 1945 à la fin de 1992 (47 ans) pour des événements ponctuels et pendant 50 ans au taux de pratique ou d'exposition actuel pour toutes les autres sources. Les résultats figurent au tableau 4.

B. Effets biologiques

184. En ce qui concerne les effets biologiques des rayonnements, le Comité a consacré l'essentiel de son attention aux effets des doses faibles. Ces effets sont peu probables mais, lorsqu'ils surviennent, ont des conséquences graves. Les limites statistiques ne permettent pas aux études épidémiologiques de fournir directement des estimations du risque présenté par des doses faibles et il faut donc se fonder sur la radiobiologie pour interpréter les résultats épidémiologiques. L'utilisation à la fois de l'épidémiologie et de la radiobiologie, particulièrement aux niveaux moléculaire et cellulaire, est utile pour élucider les conséquences de faibles doses de rayonnement.

185. L'un des domaines d'activité qui évolue le plus rapidement a trait aux mécanismes d'induction des cancers à la suite de modifications de la structure moléculaire de l'ADN. Bien que l'étude des troubles héréditaires progresse aussi rapidement, on doit encore calculer des estimations quantitatives du risque héréditaire à partir d'études sur les animaux. Même les expositions importantes à Hiroshima et Nagasaki n'ont pas permis d'obtenir des estimations quantitatives des risques héréditaires qui soient suffisamment fiables.

186. Malgré les progrès rapides de la radiobiologie et la multiplication des données épidémiologiques, le Comité n'a pas encore jugé nécessaire d'apporter des modifications importantes à ses estimations du risque.

C. Perspectives

187. Les estimations de la radio-exposition et du risque d'exposition calculées par le Comité indiquent que les rayonnements sont faiblement carcinogènes. Environ 4 % des morts dues à un cancer sont imputables à des rayonnements ionisants dont la plupart sont d'origine naturelle et sur lesquels l'être humain ne peut exercer d'influence. Néanmoins, on estime largement (mais à tort) que toutes les morts dues à un cancer à Hiroshima et à Nagasaki sont imputables aux bombardements nucléaires. Les études faites dans ces deux villes ont porté

quasiment sur toutes les personnes qui avaient été gravement exposées et ont montré que, sur 3 350 morts dues à un cancer, seulement 350 environ pouvaient être imputées à une radio-exposition due aux bombardements nucléaires.

188. Pour faire la lumière sur les incidences des sources artificielles de rayonnement, on peut entre autres comparer les doses dues à ces sources aux doses résultant du rayonnement naturel. Cette méthode est facile à appliquer à l'échelle mondiale en comparant des expositions mondiales totales (ou moyennes). Les doses collectives sont indiquées au tableau 4. Cependant, de nombreuses sources artificielles de rayonnement n'exposent que des groupes limités de population. Le paragraphe ci-après essaye d'établir une distinction entre ces situations.

189. À l'échelle mondiale, un an de pratique médicale équivaut à environ 90 jours d'exposition aux sources naturelles mais les doses individuelles dues aux procédures médicales varient de zéro (chez les personnes qui n'ont jamais été examinées ou traitées) à plusieurs milliers de fois les doses dues aux sources naturelles (chez les personnes subissant une radiothérapie). La plupart des doses engagées par un an d'opérations actuelles du cycle du combustible nucléaire sont largement distribuées et correspondent à une journée environ d'exposition aux sources naturelles. À l'exception des accidents graves, les doses aux personnes les plus exposées ne dépassent pas les doses provenant des sources naturelles et les approchent rarement. Au niveau mondial, l'exposition professionnelle ne touche qu'une faible fraction des travailleurs sous rayonnements. Dans ce groupe, les expositions sont proches de celles qui sont dues aux sources naturelles. Pour des sous-groupes peu importants, la radio-exposition professionnelle est égale environ à cinq fois celle qui est due aux sources naturelles. La dose collective engagée sur 10 000 ans par les essais nucléaires dans l'atmosphère est assez uniformément distribuée et correspond à environ 2,3 ans d'exposition aux sources naturelles. Ce chiffre correspond à la totalité des essais et n'est pas comparable aux chiffres relatifs à une seule année de pratique. Un seul accident dans une centrale nucléaire civile, à Tchernobyl, a engagé aux membres du public des doses supérieures à celles résultant d'un an d'exposition à des sources naturelles. Au niveau mondial, cet accident correspond à une vingtaine de jours d'exposition aux sources naturelles. Ces conclusions sont présentées succinctement au tableau 5.

Tableau 5

Expositions à des sources artificielles exprimées en périodes équivalentes d'exposition à des sources naturelles

Source	Base	Période équivalente d'exposition à des sources naturelles
Expositions médicales	Un an de pratique au taux actuel	90 jours
Essais d'armes nucléaires	Pratique achevée	2,3 ans
Armes nucléaires	Pratique totale à ce jour	10 jours
	Un an de pratique au taux actuel	1 jour
Accidents graves	Accidents à ce jour	20 jours
Exposition professionnelle	Un an de pratique au taux actuel	8 heures

Notes

¹ Le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants a été créé par l'Assemblée générale à sa dixième session et son mandat a été défini dans la résolution 913 (X) du 3 décembre 1955. Le Comité comprenait à l'origine les Etats membres suivants : Argentine, Australie, Belgique, Brésil, Canada, Egypte, Etats-Unis d'Amérique, France, Inde, Japon, Mexique, Royaume-Uni de Grande-Bretagne, Suède, Tchécoslovaquie et Union des Républiques socialistes soviétiques. Par sa résolution 3154 C (XXVIII), du 14 décembre 1973, l'Assemblée générale a élargi la composition du Comité, où sont entrés les Etats suivants : Allemagne (République fédérale d'), Indonésie, Pérou, Pologne et Soudan. Par sa résolution 41/62 B, du 3 décembre 1986, l'Assemblée générale a porté la composition du Comité à un maximum de 21 membres et a invité la Chine à en faire partie.

² On trouvera les précédents rapports scientifiques du Comité à l'Assemblée générale dans Documents officiels de l'Assemblée générale, treizième session, Supplément No 17 (A/3838); ibid., dix-septième session, Supplément No 16 (A/5216); ibid., dix-neuvième session, Supplément No 14 (A/5814); ibid., vingt et unième session, Supplément No 14 (A/6314 et Corr.1); ibid., vingt-quatrième session, Supplément No 13 (A/7613 et Corr.1); ibid., vingt-septième session, Supplément No 25 (A/8725 et Corr.1); ibid., trente-deuxième session, Supplément No 40 (A/32/40); ibid., trente-septième session, Supplément No 45 (A/37/45); ibid., quarante et unième session, Supplément No 16 (A/41/16); ibid., quarante-troisième session, Supplément No 45 (A/43/45). Ces documents seront mentionnés ici sous les appellations respectives de rapports de 1958, 1962, 1964, 1966, 1969, 1972, 1977, 1982, 1986 et 1988. Le rapport de 1972, avec ses annexes scientifiques, a également été publié sous le titre : Les rayonnements ionisants : Niveaux et effets, Volume I : Niveaux et Volume II : Effets (publication des Nations Unies, numéros de vente: F.72.IX.17 et 18). Le rapport de 1977, avec ses annexes scientifiques, a paru sous le titre : Sources et effets des rayonnements ionisants (publication des Nations Unies, numéro de vente : F.77.IX.1). Le rapport de 1982, avec ses annexes scientifiques, a été publié sous le titre : Rayonnements ionisants : Sources et effets biologiques (publication des Nations Unies, numéro de vente : F.82.IX.8). Le rapport de 1986, avec ses annexes scientifiques, a été publié sous le titre : Genetic and Somatic Effects of Ionizing Radiation (publication des Nations Unies, numéro de vente : E.86.IX.9). Le rapport de 1988, avec ses annexes scientifiques, a été publié sous le titre : Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation (publication des Nations Unies, numéro de vente : E.88.IX.7).

³ Le rapport et ses annexes feront l'objet d'une publication destinée à la vente.

ANNEXE I

Membres des délégations nationales qui ont assisté aux
trente-huitième, trente-neuvième, quarantième, quarante
et unième et quarante-deuxième sessions

ALLEMAGNE ¹	A. Kaul (représentant), W. Burkart, U. H. Ehling, W. Jacobi, A. M. Kellerer, F. E. Stieve, C. Streffer
ARGENTINE	D. Beninson (représentant), E. d'Amato, C. Arias, D. Cancio, A. Curti, E. Palacios
AUSTRALIE	K. H. Lokan (représentant)
BELGIQUE	J. Maisin (représentant), R. Kirchmann, H. P. Leenhouts, P. H. M. Lohman, K. Sankaranarayanan, D. Smeesters
BRÉSIL	E. Penna Franca (représentant), J. Landmann-Lipsztein
CANADA	E. G. Létourneau (représentant), A. Arsenault, D. R. Champ, R. M. Chatterjee, P. J. Dupont, V. Elaguppilai, N. E. Gentner, B. C. Lentle, D. K. Myers
CHINE	Li Deping (représentant), Liu Hongxiang (représentant), Wei Lüxin (représentant), Leng Ruiping, Pan Zhiqiang, Tao Zufan, Wu Dechang
ÉGYPTÉ	M. F. Ahmed (représentant), F. H. Hammad (représentant), F. Mohamed (représentant), H. M. Roushdy (représentant), S. E. Hashish
ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE	F. A. Mettler (représentant), L. R. Anspaugh, J. D. Boice, C. W. Edington, J. H. Harley, N. H. Harley, C. Meinhold, P. B. Selby, W. K. Sinclair, E. W. Webster, H. O. Wyckoff
FÉDÉRATION DE RUSSIE ²	L. A. Ilyin (représentant), R. Alexakhin, R. M. Barhoudarov, Y. Buldakov, V. Bebashko, N. A. Dolgova, A. Guskowa, D. F. Khokhlova, Y. Kholina, E. Komarov, O. Pavlovski, G. N. Romanov
FRANCE	P. Pellerin (représentant), E. Cardis, R. Coulon, H. Dutrillaux, A. Flury-Hérard, H. Jammet, J. Lafuma, G. Lemaire, R. Masse
INDE	D. V. Gopinath (représentant), U. Madhvanath (représentant), N. K. Notani (représentant)
INDONÉSIE	S. Soekarno (représentant), S. Wiryosimin (représentant), K. Wiharto
JAPON	H. Matsudaira (représentant), Y. Hosoda, T. Iwasaki, A. Kasai, S. Kumazawa, T. Matsuzaki, K. Nishizawa, H. Noguchi, K. Sato, K. Shinohara, S. Yano
MEXIQUE	E. Araico Salazar (représentant)

PÉROU	L. V. Pinillos Ashton (représentant)
POLOGNE	Z. Jaworowski (représentant), J. Jankowski, J. Liniecki, O. Rosiek, S. Sterlinski, I. Szumiel
ROYAUME-UNI DE GRANDE-BRETAGNE ET D'IRLANDE DU NORD	J. Dunster (représentant), R. H. Clarke, J. Denekamp, Sir Richard Doll
SLOVAQUIE ³	M. Klímek (représentant)
SOUDAN	O. I. Elamin (représentant), A. Hidayatalla (représentant)
SUÈDE	G. Bengtsson (représentant), L.-E. Holm, J. O. Snihs, L. Sjöberg

Notes

¹ Aux trente-huitième et trente-neuvième sessions : République fédérale d'Allemagne.

² Aux trente-huitième, trente-neuvième et quarantième sessions : Union des Républiques socialistes soviétiques.

³ Aux trente-huitième, trente-neuvième, quarantième et quarante et unième sessions : Tchécoslovaquie.

ANNEXE II

Fonctionnaires scientifiques et consultants qui ont collaboré
avec le Comité à l'élaboration du présent rapport

D. Beninson
B. G. Bennett
A. Bouville
R. Cox
J. Dunster
D. Goodhead
L. E. de Geer
J. Hall

L. E. Holm
G. N. Kelly
M. O'Riordan
W. J. Schull
P. Selby
J. W. Stather
J. Valentin
F. Vogel