



**Nations Unies**

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

**Assemblée générale**

Documents officiels

Cinquante-cinquième session

Supplément n° 46 (A/55/46)

**Assemblée générale**  
**Documents officiels**  
**Cinquante-cinquième session**  
**Supplément n° 46 (A/55/46)**

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



**Nations Unies - New York, 2000**

*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.

---

## Tables des matières

	<i>Paragraphes</i>	<i>Page</i>
I.	Introduction .....	1-7 1
II.	Généralités .....	8-19 2
	A. Les effets de l'exposition aux rayonnements .....	8-10 2
	B. Niveaux d'exposition au rayonnement .....	11-17 2
	C. Les conséquences radiologiques de l'accident de Tchernobyl .....	18-19 3
III.	Sources de radioexposition .....	20-49 3
	A. Radioexpositions naturelles .....	24-26 4
	B. Radioexpositions artificielles .....	27-37 5
	C. Expositions médicales .....	38-41 6
	D. Radioexpositions professionnelles .....	42-45 7
	E. Comparaison des radioexpositions .....	46-49 8
IV.	Cancer lié aux rayonnements .....	50-88 9
	A. Effets radiobiologiques de faibles doses de rayonnement .....	54-67 10
	B. Effets combinés .....	68-72 12
	C. Épidémiologie du cancer .....	73-88 13
V.	L'accident de Tchernobyl .....	89-105 15
	A. Rejet de radionucléides .....	92-94 16
	B. Exposition des individus .....	95-98 16
	C. Effets sur la santé .....	99-105 17
 Appendices		
I.	Liste des membres des délégations nationales qui ont assisté aux quarante-quatrième à quarante-neuvième sessions .....	19
II.	Liste des fonctionnaires scientifiques et des consultants qui ont collaboré avec le Comité à l'élaboration du présent rapport .....	21

## Chapitre I

### Introduction

1. Au cours des dernières années, le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants<sup>1</sup> a entrepris un examen approfondi des sources et des effets des rayonnements ionisants. Dans le présent rapport,<sup>2</sup> le Comité, s'inspirant des principales conclusions de ses évaluations scientifiques, résume les progrès de la science des rayonnements au cours des dernières années du XX<sup>e</sup> siècle.

2. L'élaboration du présent rapport et de ses annexes scientifiques a été menée de la quarante-quatrième à la quarante-neuvième sessions du Comité. Les fonctions de président, vice-président et rapporteur ont été assurées, respectivement, par: L. Pinillos-Ashton (Pérou), A. Kaul (Allemagne) et G. Bengtsson (Suède) aux quarante-quatrième et quarante-cinquième sessions; A. Kaul (Allemagne), L.-E. Holm (Suède) et J. Lipsztein (Brésil) aux quarante-sixième et quarante-septième sessions; et L.-E. Holm (Suède), J. Lipsztein (Brésil) et Y. Sasaki (Japon) aux quarante-huitième et quarante-neuvième sessions. On trouvera à l'annexe I la liste des spécialistes qui ont participé à ces sessions en qualité de représentants officiels ou de membres de délégations nationales.

3. Le Comité tient à remercier de son concours et de ses conseils le groupe de consultants et de spécialistes qui l'a aidé à établir les annexes scientifiques (voir l'annexe II). Des représentants de l'Organisation mondiale de la santé et de l'Agence internationale de l'énergie atomique ont assisté aux sessions du Comité. La Commission internationale des unités et mesures radiologiques et la Commission internationale de protection radiologique étaient également représentées. Le Comité tient à leur exprimer sa reconnaissance pour leur participation au débat.

4. Dans l'exécution de ses tâches, le Comité a fait preuve d'une grande prudence dans l'examen des données qui lui sont soumises; il s'attache à garder une position neutre et impartiale dans l'élaboration de ses conclusions. Le Comité présente à l'Assemblée générale les résultats de ces travaux dans la partie principale du rapport, qui est rédigée en termes très généraux. Les annexes scientifiques qui accompagnent le rapport s'adressent à la communauté scientifique. Ce rapport et ses annexes font l'objet d'une publication des Nations Unies destinée à la vente intitulée "Sources et effets des rayonnements ionisants,

Rapport 2000 du Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants à l'Assemblée générale, avec annexes scientifiques".

5. Le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants, comité scientifique de l'Assemblée générale, est l'organe du système des Nations Unies chargé d'évaluer les niveaux et les effets des expositions aux rayonnements ionisants et de faire rapport sur ce sujet. Le fait que le Comité a reçu ce mandat spécifique d'un organe qui fait autant autorité renforce considérablement sa capacité de fournir à la communauté mondiale un service efficace et indépendant. L'ONU, à travers l'Assemblée générale, peut s'attribuer le mérite de ce service. Les informations fournies par le Comité aident l'Assemblée générale à faire des recommandations, en particulier pour ce qui est de la collaboration internationale dans le domaine de la santé, du développement durable et, dans une certaine mesure, du maintien de la paix et de la sécurité internationale.

6. De nouveaux problèmes continuent d'apparaître en ce qui concerne les niveaux mondiaux d'exposition aux rayonnements et de nouvelles données biologiques sur les effets de l'exposition deviennent disponibles. Par exemple, les utilisations pacifiques et militaires de l'énergie nucléaire ont donné lieu à de grandes quantités de déchets nucléaires et les sources de rayonnement utilisées à ces deux fins ont été abandonnées, ce qui a créé une situation favorisant le trafic illicite et d'autres activités criminelles. En outre, les risques potentiels d'une exposition à de faibles doses comparables à la dose d'irradiation naturelle fait l'objet d'un débat animé et d'une controverse. Le Comité s'intéresse à ces problèmes et continuera à le faire avec de nouvelles initiatives lors de ses évaluations futures des sources, des niveaux et des effets des rayonnements.

7. Pour les gouvernements et organisations du monde entier, les évaluations que fait le Comité des sources et des effets des rayonnements constituent la base scientifique qui leur permet d'estimer les risques d'irradiation, d'établir des normes de sûreté et de radioprotection et de réglementer les sources de rayonnement. Au sein du système des Nations Unies, ces estimations sont utilisées par l'Agence internationale de l'énergie atomique dans l'exercice de ses fonctions statutaires consistant à établir des normes de radioprotection et à assurer leurs applications. Le Comité propose un nouveau programme de travail pour s'acquitter de ses obligations envers l'Assemblée générale.

## Chapitre II

### Généralités

#### A. Les effets de l'exposition aux rayonnements

8. Les rayonnements peuvent endommager les cellules vivantes, entraîner la mort de certaines d'entre elles et en modifier d'autres. La plupart des organes et tissus de l'organisme ne sont pas altérés par la perte de cellules même en très grand nombre, mais si ce nombre devient très important, on observera des dommages pouvant conduire à la mort. C'est ce qui se produit chez les individus qui sont exposés à des rayonnements au-delà d'un certain seuil. D'autres dommages peuvent survenir dans les cellules qui ne sont pas détruites, mais modifiées. Ces dommages sont généralement réparés mais si la réparation n'est pas fidèle, la modification qui en résulte sera transmise à d'autres cellules et peut éventuellement aboutir à un cancer. Si les cellules modifiées sont celles qui transmettent des informations génétiques, il peut en résulter des troubles héréditaires.

9. L'exposition aux rayonnements a également été associée à la plupart des formes de leucémie et aux cancers de nombreux organes, tels que le poumon, le sein et la thyroïde, mais pas de certains autres, comme la prostate. Toutefois, un supplément minime d'exposition (par exemple, à peu près la dose moyenne mondiale d'irradiation naturelle) s'accompagnerait d'une augmentation extrêmement faible du risque de cancer. En outre, un cancer radio-induit peut se manifester plusieurs dizaines d'années après l'exposition et ne diffère pas des cancers qui se développent spontanément ou sont attribuables à d'autres facteurs. La principale évaluation à long terme de populations exposées à des rayonnements est l'étude des quelque 86 500 survivants des bombardements atomiques d'Hiroshima et de Nagasaki, au Japon. Elle a montré qu'il y avait un excédent de quelques centaines de décès par cancer dans la population étudiée. Comme environ la moitié de cette population est encore en vie, il faudra faire des études supplémentaires pour avoir un tableau complet de la situation.

10. L'exposition aux rayonnements peut également avoir des effets héréditaires qui se manifestent chez des descendants des personnes exposées. On a pensé à une époque que ces effets menaçaient l'avenir de la race humaine en augmentant excessivement le taux de mutation naturelle. Toutefois, on n'a pas encore détecté d'effets héréditaires radio-induits dans les populations humaines

exposées, bien que l'on sache qu'il s'en produit dans d'autres espèces. Le Comité est en train de préparer un rapport complet sur les effets héréditaires des expositions aux rayonnements, qu'il soumettra à l'Assemblée générale à sa cinquante-sixième session.

#### B. Niveaux d'exposition au rayonnement

11. Nous sommes tous soumis à une irradiation naturelle, du fait des rayons cosmiques et des substances radioactives présentes à l'état naturel dans la croûte terrestre et dans notre organisme. Le radon, qui émane du sol et peut se concentrer dans les habitations, y contribue de façon importante. Le niveau de l'exposition naturelle varie selon le lieu, généralement dans le rapport de un à trois. Dans de nombreux endroits, cependant, il est 10 fois, et dans d'autres 100 fois, supérieur à la moyenne.

12. Les activités humaines comportant l'utilisation de rayonnements et de substances radioactives entraînent une exposition qui s'ajoute à l'exposition naturelle, certaines d'entre elles ne faisant que l'amplifier – c'est le cas par exemple de l'extraction et de l'utilisation de minerais contenant des substances radioactives et de la production d'énergie lorsque l'on brûle du charbon contenant de telles substances. La contamination de l'environnement par les résidus radioactifs provenant des essais d'armes nucléaires continue d'être une source mondiale d'irradiation. La production de matières nucléaires à des fins militaires a laissé en héritage, dans certaines parties du monde, de grandes quantités de résidus radioactifs. Les centrales et autres installations nucléaires rejettent des matières radioactives dans l'environnement et produisent des déchets radioactifs pendant leur fonctionnement et lors de leur déclassement. L'utilisation de matières radioactives dans l'industrie, l'agriculture et la recherche se développe dans le monde entier et la mauvaise manipulation de sources de rayonnement a fait des victimes.

13. Ces activités n'entraînent généralement des expositions qui ne correspondent qu'à une faible fraction de la dose moyenne d'irradiation naturelle dans le monde. Toutefois, certains groupes de population, au voisinage d'installations rejetant des matières radioactives dans l'environnement, peuvent recevoir des doses plus élevées. L'exposition de personnes du public est soumise à des limites internationalement reconnues qui sont parfois fixées à des niveaux inférieurs au niveau mondial moyen d'irradiation naturelle. Il faut noter que si certains des sites ayant des quantités élevées de résidus radioactifs étaient habités ou réhabités, les résidents seraient exposés à des

doses supérieures à la dose moyenne mondiale d'irradiation naturelle.

14. L'utilisation médicale des rayonnements est la principale source de radioexposition due à l'homme et elle prend une importance croissante. Elle comprend la radiologie diagnostique, la radiothérapie, la médecine nucléaire et la radiologie interventionnelle. De nombreux habitants de la planète (en particulier dans les pays en développement) ne peuvent encore bénéficier de toutes ces nouvelles techniques, qui ne sont pas disponibles partout. Pour le moment, par conséquent, ils sont moins exposés aux rayonnements utilisés pour les examens et les traitements médicaux que les habitants des pays qui profitent de ces méthodes de pointe, mais la situation va vraisemblablement changer dans l'avenir et devra être suivie par le Comité.

15. Le niveau moyen d'exposition dû aux utilisations médicales des rayonnements dans les pays développés est équivalent à environ 50 % de l'exposition moyenne au rayonnement naturel dans le monde. Dans ces pays, la tomographie assistée par ordinateur ne représente que quelques pour cent des actes mais près de la moitié de l'exposition liée au diagnostic médical. Des lésions radiologiques sévères se sont produites à la suite d'une mauvaise pratique de certaines techniques interventionnelles (par exemple procédure radiologique pour suivre la dilatation des artères coronaires) et de la radiothérapie.

16. La radioexposition peut également résulter de l'activité professionnelle, comme c'est le cas dans l'industrie, la médecine et la recherche, pour ceux qui utilisent des rayonnements ou des substances radioactives, ainsi que pour les passagers et les équipages dans les transports aériens. Elle est très importante pour les astronautes.

17. Le niveau moyen de radioexposition professionnelle est généralement comparable à celui de l'exposition au rayonnement naturel, mais un faible pourcentage de travailleurs reçoivent des doses plusieurs fois supérieures à cette dernière. L'exposition des travailleurs est soumise à des limites internationalement reconnues, qui sont environ 10 fois supérieures à l'exposition moyenne au rayonnement naturel.

### **C. Les conséquences radiologiques de l'accident de Tchernobyl**

18. L'accident survenu à la centrale nucléaire de Tchernobyl est l'accident radiologique le plus grave qui se soit jamais produit. Il a, en quelques jours ou semaines, causé la mort de 30 travailleurs et provoqué des radiolésions chez des centaines d'autres. Il a également entraîné l'évacuation immédiate, en 1986, d'environ 116 000 habitants de zones voisines du réacteur et la réinstallation permanente, après 1986, d'environ 220 000 personnes du Bélarus, de la Fédération de Russie et d'Ukraine. Il a fortement perturbé la vie psychologique et sociale des personnes touchées et entraîné d'importantes pertes économiques dans toute la région. De vastes superficies de ces trois pays ont été contaminées et des dépôts radionucléides ont été mesurés dans tous les pays de l'hémisphère nord.

19. Il y a eu environ 1 800 cas de cancer de la thyroïde chez les enfants exposés au moment de l'accident et, si la tendance actuelle se poursuit, il pourrait y en avoir davantage dans les décennies à venir. En dehors de cette augmentation, rien ne permet de conclure à un impact majeur sur la santé de la population 14 ans après l'accident. Il n'y a aucune preuve scientifique d'une augmentation de l'incidence globale des cancers ou de la mortalité ou de troubles non malins qui pourrait être liée à la radioexposition. Le risque de leucémie, qui est une des principales préoccupations en raison de la courte période de latence de cette maladie, ne semble pas élevé même parmi les travailleurs chargés de la remise en état. Bien que les personnes qui ont été exposées aux doses les plus fortes courent un risque accru de subir des effets liés aux rayonnements, il est peu probable que des conséquences sanitaires graves soient à craindre pour la grande majorité de la population du fait d'une irradiation due à l'accident de Tchernobyl.

### Chapitre III

#### Sources de radioexposition

20. Les rayonnements ionisants sont des ondes électromagnétiques et des particules qui peuvent avoir un effet ionisant, c'est-à-dire arracher un électron à un atome ou à une molécule du milieu à travers lequel ils se propagent. Ils peuvent être émis lors de la désintégration naturelle de certains noyaux instables ou à la suite d'une excitation d'atomes et de leurs noyaux dans des réacteurs nucléaires, des cyclotrons, des appareils de radiographie ou d'autres instruments. Pour des raisons historiques, la composante photon (électromagnétique) du rayonnement ionisant émise par un noyau excité est appelée rayon

gamma et celle qui est émise par des appareils est appelée rayon X. Les particules chargées émises par le noyau sont des particules alpha (noyaux d'hélium) et bêta (électrons).

21. Le phénomène d'ionisation, dans la matière vivante, entraîne toujours une modification au moins temporaire des atomes et des molécules et peut donc endommager les cellules. Si un dommage cellulaire se produit et n'est pas réparé de façon fidèle, il peut empêcher la cellule de survivre ou de se reproduire ou encore d'accomplir ses fonctions normales. Il peut aussi aboutir à une cellule viable mais modifiée.

22. La quantité utilisée pour exprimer l'exposition d'une matière telle que le corps humain est la dose absorbée dont l'unité est le gray (Gy). Mais les effets biologiques par unité de dose absorbée diffèrent selon la nature du rayonnement et la partie du corps qui est exposée. Pour tenir compte de ces différences, on utilise une quantité pondérée, appelée dose effective, dont l'unité est le sievert (Sv). Lorsqu'il rend compte des niveaux d'exposition humaine, le Comité utilise généralement la dose effective. Dans le présent rapport, seul sera employé le mot "dose", les unités utilisées permettant de faire la différence entre la dose absorbée et la dose effective. Une source radioactive est caractérisée par son activité, qui est le nombre de désintégrations nucléaires par unité de temps. L'unité d'activité est le becquerel (Bq), qui correspond à une désintégration par seconde.

23. Pour évaluer les effets de l'exposition d'un groupe de population défini, on peut utiliser la somme de toutes les doses reçues par les membres du groupe, appelée "dose collective", exprimée en homme-sievert (mSv). La valeur de la dose collective divisée par le nombre d'individus dans la population exposée est la dose par habitant en sieverts (Sv). L'annexe A du présent rapport intitulé "Méthodes d'évaluation des doses" indique les méthodes générales appliquées par le Comité pour évaluer les doses de rayonnement.

#### A. Radioexpositions naturelles

24. Tous les organismes vivants sont exposés en permanence à des sources naturelles de rayonnements qui ont toujours existé. Ce sont les rayons cosmiques venant de l'espace et du soleil, les radionucléides qui se trouvent dans l'écorce terrestre, dans les matériaux de construction et dans l'air, l'eau et les aliments ainsi que dans le corps humain lui-même. Certaines de ces expositions sont relativement constantes et uniformes pour tous les

individus en tout lieu, par exemple la dose de potassium-40 résultant de l'ingestion d'aliments. D'autres varient considérablement selon le lieu: les rayons cosmiques, par exemple, sont plus intenses en haute altitude et les concentrations d'uranium et de thorium dans le sol sont élevées dans certaines régions. Les expositions peuvent également varier du fait des activités humaines. En particulier, les matériaux de construction et la conception des habitations, et les systèmes de ventilation influent fortement sur le niveau de radon, gaz radioactif, et de ses produits de filiation qui contribuent fortement, par inhalation, aux doses absorbées.

25. Les composantes des expositions résultant des sources naturelles de rayonnement ont été réévaluées dans le présent rapport sur la base de nouvelles informations et données provenant de mesures et d'une analyse plus approfondie des processus en cause. Les résultats sont présentés à l'annexe B, intitulée "Expositions provenant de sources naturelles de rayonnement". Les composantes de l'exposition ont été additionnées de manière à fournir une estimation de l'exposition moyenne dans le monde. Cette dernière ne se rapporte pas à un individu particulier, car il y a une large répartition des expositions dues à chaque source et les doses effectives qui en résultent se combinent de diverses façons en chaque lieu, en fonction de la concentration spécifique des radionucléides dans l'environnement et dans l'organisme, de la latitude, de l'altitude, et de beaucoup d'autres facteurs.

26. On détermine la dose effective mondiale annuelle par habitant en additionnant les diverses composantes, comme cela est résumé au tableau 1. La valeur obtenue est de 2,4 mSv. Toutefois, la fourchette des doses individuelles est large. On peut penser que dans toute population importante, environ 65 % des habitants reçoivent des doses effectives annuelles de 1 à 3 mSv, environ 25 % moins de 1 mSv et 10 % plus de 3 mSv.

Tableau 1

**Doses moyennes de rayonnement provenant de sources naturelles (mSv)**

<i>Source</i>	<i>Dose effective annuelle moyenne dans le monde</i>	<i>Fourchette typique</i>
<b>Exposition externe</b>		
Rayons cosmiques	0,4	0,3-1,0 <sup>a</sup>
Rayons gamma terrestres	0,5	0,3-0,6 <sup>b</sup>
<b>Expositions internes</b>		

Inhalation (principalement radon)	1,2	0,2-10 <sup>c</sup>
Ingestion	0,3	0,2-0,8 <sup>d</sup>
<b>Total</b>	<b>2,4</b>	<b>1-10</b>

<sup>a</sup> Du niveau de la mer à une altitude élevée.

<sup>b</sup> Suivant la composition du sol et des matériaux de construction en radionucléides.

<sup>c</sup> Suivant l'accumulation de radon à l'intérieur des locaux.

<sup>d</sup> Suivant la composition des aliments et de l'eau potable en radionucléides.

## B. Radioexpositions artificielles

27. Diverses activités, pratiques et événements mettant en jeu des sources radioactives ont entraîné des rejets de matières radioactives dans l'environnement et l'exposition de populations humaines. L'évaluation des doses qui en sont résultées est présentée à l'annexe C du présent rapport, intitulée "Radioexpositions artificielles". Ce sont les essais d'armes nucléaires dans l'atmosphère de 1945 à 1980 qui ont constitué la principale source artificielle de radioexposition de la population mondiale. Chaque essai a entraîné le rejet non contrôlé dans l'environnement de quantités substantielles de matières radioactives, qui se sont largement dispersées dans l'atmosphère et se sont déposées sur toute la surface de la planète.

28. Le Comité a accordé une attention spéciale à l'évaluation des doses dues aux explosions nucléaires dans l'atmosphère. La dose effective collective à la population mondiale résultant de cette pratique a été évaluée dans son rapport de 1982 sur la base de nombreuses mesures, effectuées à l'époque des essais, du dépôt mondial de <sup>90</sup>Sr et de <sup>137</sup>Cs et de l'occurrence de ces radionucléides et d'autres radionucléides provenant des retombées dans les aliments et le corps humain.

29. De nouvelles informations sont maintenant disponibles sur le nombre et les rendements des essais nucléaires. Elles n'étaient pas entièrement divulguées auparavant par les pays qui procédaient aux essais pour des considérations militaires. Une liste actualisée des essais nucléaires dans l'atmosphère effectués à chacun des sites d'essais est donnée dans le présent rapport (voir annexe C). Bien que les rendements explosifs totaux de chaque essai aient été révélés, le rendement de fission et de fusion sont encore le plus souvent tenus secrets. Certaines hypothèses générales ont été faites pour permettre de les préciser pour chaque essai afin d'estimer les quantités de radionucléides

produites lors des explosions. Le total estimé des rendements de fission des essais pris isolément concorde avec le dépôt mondial des principaux radionucléides de fission,  $^{90}\text{Sr}$  et  $^{137}\text{Cs}$ , déterminés par les réseaux de surveillance mondiaux.

30. Avec de meilleures estimations de la production de chaque radionucléide lors des différents essais et à l'aide d'un modèle empirique de transport atmosphérique, on peut déterminer la trajectoire dans le temps de la dispersion et le dépôt de radionucléides et estimer les doses annuelles provenant des diverses voies d'exposition dans chaque hémisphère. C'est ainsi qu'il a été calculé que la dose effective annuelle moyenne à la population mondiale avait atteint un pic de 150  $\mu\text{Sv}$  en 1963, puis avait diminué pour tomber à 5  $\mu\text{Sv}$  en 2000, du fait des radionucléides résiduels dans l'environnement, principalement  $^{14}\text{C}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  et  $^{137}\text{Cs}$ . Dans l'hémisphère nord, où ont eu lieu la majorité des essais, les doses annuelles moyennes sont supérieures de 10 % à celles de l'hémisphère sud. Bien qu'elles aient suscité beaucoup d'inquiétude au moment des essais, les doses annuelles sont restées relativement faibles, atteignant au maximum environ 7 % du rayonnement naturel.

31. On a également évalué, à l'aide des informations disponibles, l'exposition des populations vivant à proximité des sites d'essais. Le niveau de détail n'est pas encore suffisant pour documenter des expositions avec une grande précision. On ne s'est guère préoccupé, dans les premières années des programmes d'essais, des conditions locales et des risques d'exposition, mais des efforts sont faits aujourd'hui pour reconstruire les doses afin d'avoir des précisions et de documenter les expositions locales et régionales ainsi que les doses délivrées.

32. Les essais souterrains n'ont donné lieu à des expositions au-delà des sites d'essai qu'en cas de fuite de gaz radioactifs ou de leur rejet dans l'atmosphère. La plupart des essais souterrains avaient des rendements beaucoup plus faibles que les essais dans l'atmosphère et il a généralement été possible de contenir les débris. Entre 1962 et 1990, de tels essais ont été effectués au rythme de 50 par an ou davantage. Bien que la plupart des pays aient l'intention de s'entendre pour interdire de nouveaux essais, aussi bien dans l'atmosphère que sous terre, le Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (voir la résolution 50/245 de l'Assemblée générale) n'est pas encore entré en vigueur. D'autres essais souterrains ont eu lieu, et l'on ne peut pas encore affirmer que cette pratique a cessé.

33. À l'époque de la constitution des arsenaux d'armes nucléaires, en particulier dans les premières années (1945-1960), il y a eu des rejets de radionucléides exposant les populations locales sous le vent ou en aval des installations nucléaires. Comme on se souciait peu des risques d'irradiation et que la surveillance des rejets était limitée, l'évaluation doit être fondée sur la reconstruction des doses. Des résultats sont encore obtenus qui permettent de documenter ce qui s'est passé. Les pratiques se sont beaucoup améliorées et l'on procède maintenant à la réduction des arsenaux. De ce fait, les expositions imputables au cycle du combustible militaire sont tombées à des niveaux très faibles.

34. La production d'électricité d'origine nucléaire, en revanche, se poursuit. En supposant que cette pratique dure encore 100 années, on peut estimer la dose collective maximale à partir des doses cumulées pendant cette période. Le chiffre normalisé tronqué à 100 ans est de 6 mSv par gigawatt-année. En supposant que la production actuelle de 250 gigawatts par an se maintienne, on obtient une dose collective tronquée par année de pratique de 1 500 mSv à la population mondiale, soit une dose maximale par habitant inférieure à 0,2  $\mu\text{Sv}$  par an.

35. Sauf dans le cas d'accidents ou bien sur les sites où des déchets se sont accumulés et ont provoqué une forte contamination locale, il n'y a pas d'autres pratiques donnant lieu à des expositions importantes du fait de radionucléides rejetés dans l'environnement. Les estimations des rejets d'isotopes produits et utilisés dans les applications industrielles et médicales sont actuellement examinées, mais ils semblent s'accompagner de niveaux d'exposition assez insignifiants. Des pratiques futures possibles, telles que le démantèlement des armes, le déclassement des installations et les projets de traitement des déchets pourront être passés en revue à mesure que l'on acquerra de l'expérience, mais aucune d'entre elles ne devrait donner lieu à des rejets ou du moins à des rejets importants de radionucléides et les doses délivrées devraient être négligeables. Pour ce qui est de la pratique médicale, il se peut que les doses individuelles les plus élevées, atteignant en moyenne environ 0,5 mSv, soient reçues par des personnes approchant de très près des membres de leur famille subissant des traitements à l'iode 131.

36. En cas d'accident, la contamination de l'environnement et les expositions peuvent devenir importantes. L'accident de Tchernobyl a été à cet égard un exemple notable. Les expositions les plus élevées ont été enregistrées au voisinage du réacteur, mais on a mesuré des

niveaux faibles d'exposition dans la région européenne et dans tout l'hémisphère nord. Dans la première année qui a suivi l'accident, les doses annuelles moyennes les plus élevées à l'échelon régional en Europe, hors de l'ex-Union des Républiques socialistes soviétiques, ont été inférieures à 50 % du rayonnement naturel. Elles ont ensuite diminué rapidement. Les doses plus élevées et les conséquences sanitaires possibles dans la région de l'accident sont actuellement analysées.

37. Plusieurs industries transforment ou utilisent de grandes quantités de matières premières contenant des radionucléides naturels. Leurs rejets dans l'atmosphère et dans l'eau et les sous-produits et déchets qu'elles utilisent peuvent contribuer à accroître l'exposition de la population. Les expositions les plus fortes estimées sont dues à la production d'acide phosphorique, aux usines de traitement de sables minéraux et aux centrales au charbon. Bien que quelques résidents locaux aient pu recevoir jusqu'à environ 100  $\mu$ Sv par an, des doses de 1 à 10  $\mu$ Sv sont probablement plus courantes.

### C. Expositions médicales

38. Les rayonnements ionisants sont largement utilisés dans le monde entier à des fins diagnostiques et thérapeutiques, encore que les ressources et la pratique de la radiologie médicale varient considérablement d'un pays à l'autre. En général, les irradiations médicales sont limitées à une région anatomique déterminée et répondent à des objectifs cliniques précis, de manière à avoir directement un bénéfice pour la personne examinée ou traitée. Les expositions à des fins diagnostiques sont caractérisées par des doses assez faibles (les doses effectives se situent généralement dans une fourchette de 0,1 à 10 mSv) qui suffisent en principe à fournir l'information clinique nécessaire. Les doses par habitant qui en résultent sont indiquées au tableau 2. En revanche, les expositions thérapeutiques donnent lieu à des doses beaucoup plus élevées délivrées avec précision en fonction du volume de la tumeur (les doses prescrites vont généralement de 20 à 60 Gy) pour éradiquer une maladie, principalement le cancer, ou pour atténuer des symptômes. Les expositions diagnostiques ou thérapeutiques de volontaires dans le cadre d'études contrôlées à des fins de recherche sont relativement peu nombreuses. La radiologie médicale est pratiquée de façon systématique et les accidents liés aux rayonnements sont assez rares.

39. Le Comité a évalué les doses d'irradiation dues aux actes médicaux sur la base des renseignements recueillis

auprès de tous les États Membres à l'aide d'un questionnaire. Quatre niveaux de soins de santé ont été distingués en fonction du nombre de médecins en exercice dans ces pays, les chiffres allant de un médecin pour 1 000 habitants au niveau I à un pour plus de 10 000 au niveau IV. On a fait la moyenne des données disponibles pour obtenir des valeurs représentatives de la fréquence des examens et des doses par pays à chaque niveau. Ces chiffres ont ensuite été extrapolés à la population de tous les pays, à chaque niveau, et à la population mondiale; ils sont présentés au tableau 2. Les résultats détaillés de l'évaluation du Comité sont présentés à l'annexe D, intitulée: "Radioexpositions médicales".

Tableau 2

#### Radioexpositions dues aux examens diagnostiques aux rayons-x

Niveau de soins de santé	Nombre d'habitants pour un médecin	Nombre annuel d'examens pour 1 000 habitants	Dose effective annuelle moyenne par habitant (mSv)
I	<1 000	920	1,2
II	1 000-3 000	150	0,14
III	3000-10 000	20	0,02
IV	>10 000	<20	<0,02
<b>Moyenne mondiale</b>		<b>330</b>	<b>0,4</b>

40. Les estimations du nombre d'examens radiologiques, d'après les diverses analyses effectuées par le Comité, indiquent une tendance régulière à la hausse. On peut s'attendre que les utilisations médicales des rayonnements et les doses qui en résultent continuent d'augmenter du fait de l'évolution des modalités des soins de santé, facilitée par les progrès de la technologie et le développement économique. Par exemple, il est probable que les utilisations des rayons-x vont se multiplier, et en particulier, que la tomographie assistée par ordinateur et les méthodes interventionnelles prendront une importance croissante. La pratique de la médecine nucléaire sera déterminée par l'emploi de produits radiopharmaceutiques nouveaux et plus spécifiques pour le diagnostic et le traitement et il y aura une demande accrue de radiothérapie en raison du vieillissement de la population. On peut s'attendre aussi à un usage accru de la radiologie médicale dans les pays en développement, où les installations et les services sont à l'heure actuelle souvent insuffisants.

41. Il est donc nécessaire que le Comité entreprenne de nouvelles analyses faisant autorité de la pratique à l'échelle mondiale, en réunissant systématiquement les nouvelles données recueillies dans le cadre d'enquêtes nationales, en particulier dans les régions où les connaissances sont actuellement fragmentaires, et en explorant de meilleures méthodes de modélisation afin de fournir des évaluations plus fines des expositions au niveau mondial. Cette tâche importante aidera à suivre et à faire connaître les niveaux et les tendances des doses découlant de l'évolution rapide et la pratique de la radiologie médicale et incitera aussi à procéder à de nouvelles évaluations et à un examen critique des pratiques des différents pays.

#### D. Radioexpositions professionnelles

42. Certaines catégories professionnelles sont exposées à des sources artificielles de rayonnement, par exemple dans les installations nucléaires ou les établissements médicaux, et certains travailleurs à une irradiation naturelle amplifiée. Le Comité entend par "expositions professionnelles" les expositions sur le lieu de travail qui sont directement liées à l'exercice de la profession. Les expositions professionnelles ont été évaluées par le Comité sur la base des données qui lui ont été communiquées par les autorités nationales en réponse à des questionnaires. Les données résumées qui sont présentées à l'annexe E, intitulée: "Radioexpositions professionnelles" sont assez complètes. Elles fournissent des moyennes sur cinq ans concernant diverses professions pour la période 1975-1994, la place la plus importante étant faite aux sources artificielles, pour lesquelles les pays tiennent généralement des statistiques à des fins réglementaires. Lorsque l'on a besoin de connaître l'exposition moyenne d'une catégorie de travailleurs, c'est le nombre de travailleurs contrôlés qui est pris en considération.

43. Pour les estimations de la radioexposition professionnelle présentées ici, le Comité a bénéficié d'une base de données beaucoup plus vaste et plus complète que celle dont il disposait précédemment. Les efforts déployés par les pays pour enregistrer et améliorer les données dosimétriques ont été reflétés dans les réponses à l'enquête sur la radioexposition professionnelle menée par le Comité et ont permis d'établir de meilleures estimations des doses.

44. L'estimation actuelle par le Comité de la dose effective collective mondiale aux travailleurs provenant de sources artificielles pour le début des années 90, à savoir 2 700 mSv, est environ deux fois plus faible qu'à la fin des

années 70. La réduction tient en grande partie au cycle du combustible nucléaire, en particulier l'extraction de minerai d'uranium, encore que l'on observe une diminution dans toutes les catégories principales d'activités: utilisations industrielles, usages médicaux, défense et éducation. Cette tendance se reflète également dans la dose effective annuelle moyenne dans le monde, qui est tombée d'environ 1,9 à 0,6 mSv. Le tableau 3 indique les doses annuelles moyennes aux travailleurs de diverses professions.

Tableau 3  
**Radioexpositions professionnelles**

<i>Source/pratique</i>	<i>Nombre de travailleurs suivis (mille)</i>	<i>Dose effective annuelle moyenne</i>
<b>Sources artificielles</b>		
Cycle du combustible nucléaire (y compris l'extraction de minerai d'uranium)	800	1,8
Utilisations industrielles des rayonnements	700	0,5
Activités de défense	420	0,2
Usage médical des rayonnements	2 320	0,3
Éducation/usage vétérinaire	360	0,1
<b>Total des sources artificielles</b>	<b>4 600</b>	<b>0,6</b>
<b>Sources naturelles accrues</b>		
Voyage aérien (équipage)	250	3,0
Exploitation minière (autre que le charbon)	760	2,7
Extraction du charbon	3 910	0,7
Traitement du minerai	300	1,0
Lieu de travail au dessus du sol (radon)	1 250	4,8
<b>Total des sources naturelles</b>	<b>6 500</b>	<b>1,8</b>

45. On n'a pas essayé de déduire une tendance quelconque pour les estimations des doses provenant d'une radioexposition professionnelle à des sources naturelles amplifiées, car les données sont quelque peu limitées. Le rapport de 1988 indiquait le chiffre approximatif d'environ 20 000 mSv pour cette source, qui a été ramené à 8 600 mSv dans le rapport de 1993. Le chiffre comparable pour 1990-1994 est de 5 700 mSv, mais un élément nouveau important a été ajouté pour cette période, à savoir l'exposition professionnelle à des niveaux élevés de radon et à ses produits de filiation, ce qui a porté l'estimation

globale de la dose collective à 11 700 mSv. Ce chiffre est encore considéré comme approximatif, et des données de meilleure qualité sont nécessaires. C'est là un défi à relever pour la prochaine évaluation du Comité.

### E. Comparaison des radioexpositions

46. Les doses de rayonnement reçues par la population mondiale des diverses sources d'exposition sont comparées au tableau 4. Deux grandeurs sont commodes pour les comparaisons. Pour une source qui est constante, ou qui ne change que sous l'effet de processus naturels, on utilise la dose effective annuelle mondiale par habitant, de même que pour une source qui délivre la totalité de sa dose en peu de temps. Pour les sources qui continuent d'entraîner une exposition sur de longues périodes, il est nécessaire d'indiquer la tendance au cours du temps. Les valeurs indiquées au tableau 4 sont les moyennes des doses annuelles à la population mondiale, qui ne sont pas nécessairement les doses que recevrait un individu particulier. Étant donné les variations considérables des expositions suivant le lieu, les habitudes personnelles, l'alimentation, etc., les doses aux individus diffèrent.

47. La source qui, de loin, contribue le plus à l'exposition est le rayonnement naturel. La dose annuelle par habitant est de 2,4 mSv, mais elle peut, selon les circonstances, aller de 1 à 10 mSv. De petits groupes d'individus peuvent toutefois être exposés à des niveaux beaucoup plus élevés. En certains lieux appelés zones à fond naturel de rayonnements élevé, la teneur du sol en radionucléides naturels crée des niveaux élevés d'irradiation externe. La variabilité de la concentration du radon à l'intérieur des locaux est un phénomène beaucoup plus significatif et répandu.

48. La deuxième source d'exposition, par ordre d'importance, est l'utilisation médicale des rayonnements. La tendance à l'augmentation de ce type d'exposition reflète l'extension de l'usage et de la disponibilité des services radiologiques dans le monde.

49. L'exposition de la population mondiale due aux explosions nucléaires dans l'atmosphère a, pendant la période d'essais la plus intense (1958-1962), suscité de vives inquiétudes lorsque l'on s'est rendu compte du niveau qu'elle avait atteint. Ces essais s'accompagnaient du rejet incontrôlé de grandes quantités de matières radioactives directement dans l'atmosphère. De toutes les pratiques ou activités humaines, ce sont les essais nucléaires dans l'atmosphère qui ont donné lieu aux plus importants rejets de radionucléides dans l'environnement.

À leur niveau maximum, en 1963, les doses annuelles ont atteint en moyenne 7 % du fond naturel de rayonnements. Les niveaux résiduels des radionucléides à longue durée de vie encore présents dans l'environnement contribuent peu à l'exposition annuelle de la population mondiale.

Tableau 4  
**Doses effectives annuelles par habitant en 2000 provenant de sources naturelles et artificielles**

<i>Source</i>	<i>Doses effectives annuelles par habitant dans le monde entier (mSv)</i>	<i>Fourchette ou tendance de l'exposition</i>
Rayonnement naturel	2,4	Normalement fourchette de 1 à 10 mSv, selon les circonstances en des lieux particuliers, dans une population non négligeable également à 10-20 mSv.
Examens médicaux, diagnostics	0,4	Fourchette de 0,04 à 1,0 mSv pour les niveaux les plus bas et les plus élevés.
Essais nucléaires dans l'atmosphère	0,005	A diminué d'un maximum de 0,15 mSv en 1963. Plus élevé dans l'hémisphère nord et plus faible dans l'hémisphère sud.
Accident de Tchernobyl	0,002	A diminué d'un maximum de 0,04 mSv en 1986 (moyenne dans l'hémisphère nord. Plus élevée dans les endroits proches du site de l'accident.
Production nucléaire d'électricité (voir par. 34)	0,002	A augmenté avec l'expansion des programmes mais diminué avec l'amélioration de la pratique.

## Chapitre IV

### Cancer lié aux rayonnements

50. Les effets des rayonnements résultent des dommages que leur action cause dans les cellules, qui peuvent être tuées ou modifiées de manière telle que le fonctionnement normal d'organes et de tissus s'en trouve altéré. Pour la plupart des organes et tissus, la perte d'un nombre même considérable de cellules est sans conséquences, mais si ce nombre devient très important, des dommages observables seront infligés à l'organe ou aux tissus, et par conséquent

à l'individu. Cela ne se produit que si la dose de rayonnement est suffisamment importante pour tuer un grand nombre de cellules. C'est le cas chez tous les individus qui reçoivent une dose aiguë supérieure au seuil à partir duquel s'exerce l'effet, qui est pour cette raison, appelé "déterministe".

51. Si la cellule n'est pas tuée par la radiolésion, mais seulement modifiée, le dommage est généralement réparé. Si la réparation n'est pas entièrement fidèle, la modification sera transmise aux cellules filles et pourra éventuellement aboutir à un cancer dans le tissu ou l'organe de l'individu exposé. Si le dommage survient dans une cellule qui transmet l'information génétique aux descendants de l'individu exposé, il peut y avoir des anomalies héréditaires. Ces effets chez les individus ou leurs descendants sont appelés "stochastiques", ce qui signifie qu'ils sont aléatoires.

52. Pour résumer, il n'y aura des effets déterministes (aigus) que si la dose de rayonnement est élevée, comme dans les accidents. Les effets stochastiques (cancer et effets héréditaires) peuvent résulter de dommages dans une cellule unique. À mesure que la dose délivrée au tissu augmente à partir d'un faible niveau, des cellules de plus en plus nombreuses sont endommagées et la probabilité d'effets stochastiques augmente.

53. Depuis les 45 années que le Comité examine les informations relatives aux effets biologiques des rayonnements, d'importants progrès scientifiques ont été accomplis et il en est résulté une meilleure compréhension des phénomènes. L'état actuel des connaissances des effets de rayonnement et les principaux résultats des évaluations du Comité sont résumés ci-après.

### **A. Effets radiobiologiques de faibles doses de rayonnement**

54. Le Comité s'est intéressé au vaste domaine des études expérimentales consacré aux effets des rayonnements sur les systèmes cellulaires ainsi que sur les végétaux et les animaux. Nombre de ces effets et des facteurs qui les modifient ont enrichi nos connaissances des effets des rayonnements pour l'être humain et peuvent être évalués de façon plus détaillée que dans les études sur l'homme. En outre, la radiobiologie fondamentale inclut désormais le champ de la radiobiologie moléculaire, ce qui contribue à une meilleure compréhension des mécanismes de réaction aux rayonnements.

55. Les lésions de l'acide désoxyribonucléique (ADN), au sein du noyau, sont le principal événement déclencheur par lequel les rayonnements infligent des dommages à long terme aux organes et aux tissus de l'organisme. On pense que les cassures double brin sont les causes les plus probables de dommages critiques. Des traces de rayonnement unique sont susceptibles de provoquer des cassures double brin et, en l'absence de réparation fidèle, pourraient entraîner des dommages à long terme, même aux doses les plus faibles. Les lésions à d'autres constituants cellulaires (modifications épigénétiques) peuvent influencer sur le fonctionnement de la cellule et la progression vers la malignité.

56. De nombreux gènes interviennent, notamment ceux qui sont responsables de la réparation de l'ADN et de la régulation du cycle cellulaire. La mutation de ces gènes se traduit chez l'être humain par divers troubles qui confèrent une sensibilité au rayonnement et une prédisposition aux cancers. Ainsi, la mutation de l'un des très nombreux gènes impliqués dans les voies de contrôle ("checkpoints") risque de ne pas laisser suffisamment de temps pour la réparation des dommages, car la cellule perd son aptitude à retarder la progression dans le cycle cellulaire après une radioexposition.

57. Les cellules ont un certain nombre de mécanismes biochimiques leur permettant de reconnaître et de prendre en charge des formes particulières de lésions. Cette question est examinée à l'annexe F, intitulée "Réparation de l'ADN et mutagenèse". Un rôle clef est joué par le gène suppresseur de tumeur *TP53*, qui est perdu ou muté dans plus de la moitié de toutes les tumeurs humaines. La protéine P53 qu'il produit contrôle à la fois l'arrêt du cycle cellulaire et un mécanisme d'apoptose (mort cellulaire programmée qui contribue à empêcher certaines cellules endommagées de progresser vers le stade transformé de la croissance maligne). Certains de ces mécanismes interviennent également dans le processus de réponse au stress ou d'adaptation qui ont pour effet de limiter l'étendue ou l'issue des lésions. Même avec l'induction et l'action de tels mécanismes, il est clair que des radiolésions mal réparées peuvent favoriser l'induction de cancer ou de maladies héréditaires.

58. Les proto-oncogènes (gènes pouvant être activés indûment et participer alors à l'oncogenèse) et les gènes suppresseurs de tumeurs contrôlent un ensemble complexe de mécanismes biochimiques qui entrent en jeu dans la signalisation et l'interaction cellulaires, la croissance, la mitogenèse, l'apoptose, la stabilité du génome et la différenciation. La mutation de ces gènes peut

compromettre ces mécanismes de contrôle et contribuer au développement en plusieurs étapes du cancer.

59. L'activation des proto-oncogènes par translocation chromosomique est souvent associée aux premiers stades avec le développement de leucémies et de lymphomes, bien qu'il y ait aussi perte de gènes. Pour de nombreuses tumeurs solides, il faut qu'il y ait une mutation avec perte de fonction des gènes suppresseurs de tumeurs qui contrôlent la prolifération cellulaire dans des tissus particuliers. L'apparition par la suite d'une instabilité du génome du fait d'autres mutations dans les clones de cellules peut jouer un rôle déterminant dans le passage à la malignité. On pense aussi que la perte de contrôle de l'apoptose joue un rôle important dans tout le processus d'oncogenèse.

60. Le caractère multiphase de l'oncogenèse est examiné à l'annexe G, intitulée "Effets biologiques à de faibles doses de rayonnement". Il y a encore beaucoup à apprendre sur le processus. Bien que l'idée selon laquelle ce sont des mutations génétiques séquentielles interagissantes qui seraient la principale cause de l'oncogenèse soit plus fermement établie, on comprend encore mal l'interaction complexe entre ces événements et les conséquences pour le comportement cellulaire et l'homéostasie tissulaire; il y a également des incertitudes quant à la contribution faite au développement de tumeurs malignes des événements cellulaires non mutationnels (épigénétiques) tels que le silençage des gènes et les changements de la communication cellulaire.

61. On a peu de données directes sur la nature des événements déclencheurs de tumeurs chez l'homme qui seraient associés à une irradiation et il ne faut pas s'attendre à des progrès rapides dans ce domaine. En revanche, des progrès satisfaisants ont été faits dans la compréhension des événements précoces dans les tumeurs liées à une exposition chez la souris. Ces observations moléculaires renforcent l'opinion exprimée dans le rapport de 1993 selon laquelle la cancérogenèse radio-induite tendrait à procéder par des pertes génétiques, mais il ne faudrait pas pour autant rejeter l'idée d'une contribution d'événements épigénétiques précoces.

62. De nombreuses informations font penser que la réparation de l'ADN et d'autres fonctions de réponse aux lésions jouent un rôle fondamental dans l'oncogenèse. Les fonctions de réponse aux lésions de l'ADN influent sur l'apparition des événements initiaux dans le processus à plusieurs étapes et réduisent la probabilité qu'une tumeur bénigne acquière spontanément les mutations secondaires nécessaires pour évoluer intégralement vers la malignité.

Ainsi, les mutations des gènes intervenant dans la réponse aux lésions de l'ADN dans les tumeurs jouent un rôle important dans le développement spontané d'une instabilité génomique.

63. La réparation de lésions double brin parfois complexes de l'ADN peut être fautive et joue un rôle déterminant dans les effets de la dose, du débit de dose et de la qualité du rayonnement dans les cellules. Il y a encore des incertitudes quant à l'importance des réponses adaptatives aux lésions de l'ADN pour le développement tumoral; il reste encore à en caractériser de façon satisfaisante la base mécanistique, mais des associations avec l'induction de réponse au stress biochimique semblent probables. Les progrès scientifiques récents mettent en lumière les différences dans la complexité et la réparabilité entre lésions spontanées et lésions radio-induites de l'ADN. D'après ces données, il faudrait donc se garder de tirer des conclusions concernant la réaction à une faible dose en s'appuyant sur des comparaisons de l'abondance des lésions générales plutôt que sur leur nature.

64. Les conclusions des recherches sur les réponses adaptatives aux rayonnements dans les cellules et les organismes ont été examinées dans le rapport de 1994, où est décrite l'expression typique d'une réponse adaptative. Le phénomène a été interprété comme résultant de l'activation, par une petite dose initiale (amorçage) d'un mécanisme de réparation atténuant la réaction à une dose ultérieure plus importante (dose de provocation). Apparemment, l'éventail des doses d'amorçage est limité, le délai d'exposition à la dose de provocation est critique, et il faut que cette dernière soit d'une intensité raisonnable. La réponse varie beaucoup entre les différents donneurs de lymphocytes. Néanmoins, la réponse adaptative a été observée dans de nombreux systèmes, y compris les lymphocytes humains, diverses cellules de souris, avec des agents chimiques tels que le peroxyde d'hydrogène et la bléomycine, et avec les rayonnements. Pour le moment, toutefois, il ne semble pas y avoir de réduction généralement reproductible de l'induction de tumeur à la suite d'une irradiation à faible dose.

65. Pour ce qui est de la réaction à une radioexposition, il faut partir du principe que toute interaction d'un rayonnement ionisant avec l'ADN entraîne des lésions qui, si elles ne sont pas réparées ou ne le sont pas fidèlement, peuvent déclencher un processus tumorigène. La mutation des gènes entraîne généralement une modulation de leur expression, avec perte de produit génique (protéines) ou altération de leurs propriétés ou quantités. L'équilibre biochimique de la cellule peut alors être rompu, ce qui

compromet la régulation des programmes de signalisation, de prolifération et de différenciation des cellules: les cellules mutées, au lieu d'être maîtrisées ou tuées, peuvent alors atteindre le stade de la croissance clonale. Des événements non mutationnels (épigénétiques) ou des lésions peuvent se produire ou contribuer à de telles modifications. Dans certains cas, le génome peut être déstabilisé, ce qui permet la multiplication de nouvelles mutations, susceptibles de favoriser une progression tumorigène.

66. Quant à la question de savoir s'il pourrait exister un seuil d'exposition en-dessous duquel il n'y aurait pas de réaction biologique, on peut raisonner à partir de considérations mécaniques. Plus précisément, on a besoin de savoir si, à très faibles doses, les processus de réparation sont plus efficaces, voire renforcés par la réponse adaptative, empêchant toute détérioration des constituants cellulaires. Un tel seuil ne pourrait exister que si les processus de réparation étaient totalement efficaces dans cette fourchette de doses ou si une seule trace était incapable de produire un effet. L'absence d'indications systématiques d'écarts importants par rapport à la linéarité de la réponse tumorigène à faibles doses aux points d'aboutissement (aberrations chromosomiques, mutations génétiques, transformations cellulaires), l'activité de mécanismes bien caractérisés de réparation fautive de l'ADN et les données sur la nature des lésions spontanées de l'ADN dans les cellules de mammifères militent contre l'existence de processus adaptatifs ou autres qui permettent de déterminer un seuil de dose pour les effets des rayonnements. Les processus qui, comme l'apoptose et la différenciation cellulaire, peuvent protéger contre les phases ultérieures de l'oncogenèse sont jugés efficaces mais peuvent être contournés; il n'y a pas de raison de penser que ces défenses agissent différemment selon que les tumeurs sont spontanées ou radio-induites ou qu'elles dépendent spécifiquement de la dose.

67. On peut donc conclure que, pour autant qu'on le sache, les rayonnements peuvent, même à faible dose, agir comme déclencheurs mutationnels de l'oncogenèse et il y a peu de chances que les défenses antitumorigènes soient dépendantes de faibles doses. En général, la réponse cancérigène ne semble donc pas être une fonction complexe de l'augmentation de la dose. La représentation la plus simple est une relation linéaire, ce qui concorde avec la plupart des données mécanistiques et quantitatives disponibles. Il peut y avoir des différences de réponse selon les types de tumeur, et des variations statistiques dans chaque ensemble de données sont inévitables. On constate un écart par rapport à la linéarité dans le cas des

données sur la leucémie, pour laquelle on utilise une fonction linéaire quadratique. Le cancer de la peau et certains cancers induits par des émetteurs alpha peuvent avoir des seuils virtuels. Étant donné l'existence d'étapes dans le processus d'oncogenèse, on utilise des fonctions linéaires ou linéaires quadratiques à des fins de représentation uniquement pour évaluer les risques éventuels liés à l'irradiation. La réponse effective peut mettre en jeu des processus multiples et rivaux qui ne peuvent être distingués séparément.

## B. Effets combinés

68. Les expositions combinées à des rayonnements et à d'autres agents physiques, chimiques ou biologiques dans l'environnement sont une réalité de la vie. Les caractéristiques et les effets des expositions combinées sont traités à l'annexe H, intitulée "Effets combinés des rayonnements et d'autres agents". Bien que des effets combinés synergiques et antagonistes soient courants à des niveaux d'expositions élevés, il n'y a pas de données solides permettant de conclure à d'importants écarts par rapport à l'additivité dans le cas d'expositions professionnelles contrôlées ou d'expositions dans l'environnement. Cela est vrai pour des considérations mécanistiques, dans les études sur l'animal et dans les évaluations reposant sur l'épidémiologie. Par conséquent, malgré l'importance potentielle des effets combinés, on considère généralement que les résultats des évaluations des effets d'agents uniques sur la santé humaine sont applicables aux expositions où interviennent des agents multiples.

69. L'écart par rapport à l'additivité dépend de la spécificité des agents aux différentes étapes de la séquence conduisant à l'effet clinique. Il ne faut toutefois s'attendre à de tels effets que dans les cas où les deux agents sont responsables d'une part importante de toutes les transitions dans la séquence. Pour les agents qui agissent indépendamment et par des mécanismes et des voies différentes, on prédit une additivité simple.

70. Étant donné que l'exposition à la fumée de cigarette et au radon est extrêmement répandue, leur effet combiné revêt une importance particulière. La fumée de cigarette est un mélange complexe d'agents chimiques et physiques, dont on ne connaît pas encore bien les mécanismes d'interaction. Les données épidémiologiques indiquent clairement que l'interaction, à des niveaux d'exposition intermédiaires et élevés a des effets plus qu'additifs sur le cancer du poumon. Par exemple, les risques accrus d'irradiation (plus qu'additifs mais moins que

multiplicatifs) pour les fumeurs sont évidents dans les études sur les mineurs exposés au radon.

71. À l'exception des rayonnements et du tabac, on ne peut guère conclure, à partir des données épidémiologiques, à la nécessité de tenir compte d'importants effets combinés, antagonistes ou synergiques. L'absence de données pertinentes ne signifie pas en soi que de telles interactions n'existent pas et qu'elles n'influent pas sur le risque d'irradiation à faibles doses. De fait, il y a des substances exerçant un effet de promotion et/ou d'inhibition de tumeurs dans l'alimentation quotidienne, de sorte que les risques de cancer dépendent du mode de vie, et en particulier des habitudes alimentaires. Ces agents peuvent non seulement modifier l'incidence naturelle ou spontanée des cancers, mais également modifier le potentiel cancérigène des rayonnements. De telles modifications influeraient sur l'issue en particulier lorsque les risques de l'irradiation ont été projetés par rapport à l'incidence spontanée des cancers.

72. D'une façon générale, on peut conclure que les agents génotoxiques ayant un comportement biologique et mécanistique similaire et agissant de la même manière auront une interaction de type concentration-addition (isoadditive). Cela signifie que des expositions concomitantes à des rayonnements ionisants et à d'autres agents endommageant l'ADN sans affinité spécifique avec les séquences d'ADN qui interviennent de façon déterminante dans la cancérogenèse se traduiront en général par des effets qui ne seront pas loin d'être isoadditifs.

### C. Épidémiologie du cancer

73. Le cancer associé aux rayonnements chez l'homme est étudié dans des groupes de population qui ont été exposés à des doses de rayonnement telles que l'on peut déceler une incidence de cancers supérieure à la normale. On peut faire des estimations du risque à partir de populations pour lesquelles les doses individuelles peuvent être raisonnablement estimées. Ces populations comprennent les survivants des bombardements atomiques, les patients irradiés médicalement, les travailleurs professionnellement exposés, les individus exposés à des radionucléides libérés dans l'environnement et les personnes exposées à des niveaux élevés de rayonnement naturel. Depuis l'évaluation des risques de cancer radio-induits qu'a faite le Comité dans son rapport de 1994, de nouvelles informations importantes sont devenues disponibles à la suite d'études épidémiologiques. Elles

sont résumées à l'annexe I, intitulée "Évaluation épidémiologique des cancers radio-induits".

74. On sait maintenant que les rayonnements peuvent provoquer des cancers dans presque n'importe quel tissu ou organe de l'organisme, bien que certains sièges aient une beaucoup plus grande prédisposition que d'autres (voir par. 77). On est parvenu à mieux comprendre, ces dernières années, des facteurs physiologiques qui interviennent, tels que le sexe et l'âge. Bien que le risque absolu d'induction de tumeur soit peu différent d'un sexe à l'autre et qu'il varie selon le siège, il est plus élevé pour la plupart des cancers solides chez la femme que chez l'homme. En ce qui concerne l'âge, les risques relatif et absolu sont d'autant plus élevés que les sujets étaient plus jeunes au moment de l'irradiation, mais là encore il y a des variations selon la localisation.

75. Le suivi de cohortes irradiées de rayonnement a montré qu'il continue d'y avoir un excédent de cancers longtemps après l'exposition, de sorte que la projection des risques sur la vie entière peut être entachée d'une forte incertitude. Les données relatives aux survivants des bombardements atomiques japonais concordent avec une fonction dose-réponse linéaire ou linéaire quadratique pour un large éventail de doses, mais la quantification des risques à de faibles doses est moins certaine en raison des limites de la précision statistique, des biais résiduels potentiels ou d'autres problèmes méthodologiques ainsi que de la possibilité de conclusion aléatoire en raison des tests statistiques multiples. Un suivi plus long de cohortes ayant reçu un large éventail de doses, par exemple les survivants des bombardements atomiques, donnera des informations plus essentielles pour les faibles doses, mais l'épidémiologie à elle seule ne permettra pas de dire s'il y a des seuils pour les faibles doses. On notera toutefois que l'incapacité de détecter une augmentation des risques à de très faibles doses ne signifie pas qu'une telle augmentation n'existe pas.

76. L'étude des survivants japonais est particulièrement importante car la cohorte consiste en une population nombreuse des deux sexes et de tous âges ayant reçu des doses très variables. Les résultats qu'elle fournit sont la principale base d'estimation du risque de cancer radio-induit. Sur les 86 572 sujets de cette cohorte suivis pendant toute leur vie, 7 578 ont succombé à des tumeurs solides entre 1950 et 1990; 334 décès peuvent être attribués à l'irradiation, de même que 87 des décès par leucémie sur les 249 survenus au cours de la même période. En 1991, date de la dernière évaluation, quelque 48 000 personnes (soit 56 % de la cohorte) étaient encore en vie. D'après les

projections, 44 % environ de la population sera encore en vie en l'an 2000.

77. Les données fournies par cette étude sur l'incidence du cancer et sur la mortalité sont très voisines, ce qui prouve les effets statistiquement significatifs des rayonnements pour les tumeurs solides prises globalement, ainsi que pour les cancers de l'estomac, du colon, du foie, du poumon, du sein, des ovaires et de la vessie. Les données relatives à l'incidence apportent également la preuve d'un risque supplémentaire de cancer de l'utérus et de cancer de la peau avec mélanome bénin. Les données sur l'incidence ou sur la mortalité n'ont pas permis d'établir de risques statistiquement significatifs pour les cancers du rectum, de la vésicule biliaire, du pancréas, du larynx, du col de l'utérus, du corps de l'utérus, de la prostate, du rein ou du bassin du rein. On note une association avec la radioexposition pour la plupart des types de leucémie, mais pas pour le lymphome malin ou le myélome multiple.

78. Le nombre de tumeurs solides associées à une radioexposition n'est pas suffisant pour permettre une analyse détaillée de l'effet de la dose pour de nombreux sièges ou types de cancers particuliers. Pour toutes les tumeurs solides confondues, la pente de la courbe dose-effet est linéaire jusqu'à 3 Sv environ, mais pour la leucémie, c'est une fonction linéaire quadratique qui convient le mieux. On ne constate de risques statistiquement significatifs de cancer dans l'Étude permanente sur les survivants que pour des doses aux organes supérieures à environ 100 mSv.

79. Les études portant sur des populations exposées à une irradiation médicale ou professionnelle ou dans l'environnement fournissent des informations sur des questions qui ne peuvent être élucidées par les données concernant les survivants des bombardements atomiques, comme les effets de doses chroniques de faible intensité, l'exposition des poumons à des rayons alpha provenant du radon, les doses hautement fractionnées et la variabilité d'une population à l'autre. D'autres études ont également produit des résultats très utiles pour certains cancers, comme la leucémie, le cancer du sein, de la thyroïde, des os et du foie. Les estimations des risques faites à partir de ces études concordent généralement avec celles de l'Étude permanente sur les survivants.

80. Certaines études extensives portant sur des personnes professionnellement exposées fournissent également des données précieuses sur les effets de faible dose. Une analyse combinée des données portant sur un nombre élevé de travailleurs de l'industrie nucléaire montre que le risque

de leucémie augmente avec la dose. Toutefois, la précision statistique de ces études est faible par rapport aux résultats obtenus à des débits de dose élevés chez les survivants des bombardements atomiques. Il est donc difficile de tirer des conclusions définitives quant aux effets du débit de dose sur les risques de cancer, en particulier parce que ces effets peuvent différer selon les types de cancer. Néanmoins, les conclusions du rapport de 1993 du Comité, sur la base de données épidémiologiques et expérimentales, à savoir que le facteur de réduction serait inférieur à 3 lorsque l'on extrapole à de faibles doses ou débits de doses, semblent encore valables en général.

81. Depuis la parution du rapport de 1994, les informations sur les effets de doses internes de rayonnement à transfert linéique d'énergie (TLE) élevé et faible, sont devenues plus nombreuses. En particulier, un risque élevé de cancer de la thyroïde dans certaines parties du Bélarus, de la Fédération de Russie et de l'Ukraine, contaminées à la suite de l'accident de Tchernobyl, apparaît lié à l'exposition à de l'iode radioactif dans l'enfance. Toutefois, l'estimation du risque, à partir de ces conclusions, est compliquée en raison des difficultés que pose l'estimation des doses et la quantification de l'effet du dépistage de la maladie. D'autres études menées dans l'ex-Union soviétique ont fourni d'autres informations sur les doses d'irradiation interne, par exemple un risque accru de cancer du poumon chez les travailleurs du complexe Mayak. Il y avait une forte incidence de la leucémie dans la population vivant au voisinage de la rivière Tetcha. Toutefois, les différentes sources de radioexposition (à la fois externes et internes) et, dans le cas des études sur la Tetcha, les effets potentiels de la migration, influent sur la quantification des risques. Les résultats de plusieurs études cas/témoins portant sur le cancer du poumon et sur le radon à l'intérieur des locaux ont été publiés ces dernières années et concordent avec les extrapolations faites à partir de données sur les mineurs exposés au radon, bien que les incertitudes statistiques de ces conclusions soient encore importantes.

82. On s'est particulièrement intéressé à l'annexe I, aux risques de cancer pour des sièges particuliers. Là encore, les nouvelles informations devenues disponibles ces dernières années se sont révélées utiles. Toutefois, pour certaines localisations, la caractérisation des risques pose encore des problèmes, en raison de la faible précision statistique lorsque le nombre excédentaire de cas est modéré ou faible. Cela peut limiter par exemple l'aptitude à estimer les tendances des risques en fonction de facteurs tels que l'âge au moment de l'exposition, le temps écoulé depuis l'exposition et le sexe. Le cancer du sein constitue

une exception, une comparaison des données relatives aux survivantes des bombardements atomiques japonais et des femmes soumises à des expositions médicales en Amérique du Nord indiquant que l'on peut parfaitement transposer les risques d'une population à l'autre. Pour certaines localisations, il est difficile de conclure à un lien avec l'irradiation (par exemple lymphome non hodgkinien, maladie de Hodgkin et myélome multiple). S'il est vrai que, dans plusieurs études les évaluations concernant le lymphome pâtissent en partie du petit nombre de cas, il faudrait les comparer à celles qui ont été faites pour la leucémie (à l'exclusion de la leucémie lymphoïde chronique) pour laquelle, bien qu'elle soit rare elle aussi, on a pu établir un lien direct, dans de nombreuses populations, avec l'irradiation.

83. Les estimations des risques sur toute la vie sont sensibles aux variations de l'incidence normale des tumeurs, et il peut en résulter des différences comparables à celles qui caractérisent la méthode de transposition d'une population à une autre ou la méthode de projection des risques. Cette variabilité met en évidence la difficulté de choisir une valeur unique pour représenter le risque de cancer radio-induit sur toute la vie. En outre, les incertitudes sont plus grandes lorsque l'on fait des estimations du risque pour certains types de cancer que pour tous les cancers confondus.

84. Sur la base des données épidémiologiques disponibles, le Comité a calculé des estimations du risque pour les cancers radio-induits. Dans une population des deux sexes, tous âges confondus, recevant une dose aiguë de 1 Sv (faible TLE), on estime que le risque à vie de mortalité par cancer solide pourrait être de 9 % pour les hommes et de 13 % pour les femmes, avec un facteur d'incertitude d'environ  $\pm 2$ . Pour les expositions chroniques, le chiffre pourrait être divisé par deux, comme il est dit dans le rapport de 1993, le facteur d'incertitude étant encore de  $\pm 2$ . On peut considérer que le risque d'incidence d'un cancer solide est environ deux fois supérieur au risque de mortalité et qu'il peut être deux fois plus élevé pour les personnes exposées dans l'enfance que pour une population exposée à tous les âges. Il faudra toutefois suivre en permanence de tels groupes pour déterminer les risques sur toute la vie. Le cas des survivants japonais des bombardements atomiques fournit des données qui militent fortement en faveur de la linéarité dans l'estimation de l'excédent de risques de cancer solide; par conséquent, on pourrait, en première approximation, faire une extrapolation linéaire des estimations à 1 Sv pour estimer les risques de cancer solide à des doses inférieures.

85. Pour la leucémie, les estimations du risque sur toute la vie sont moins variables. On peut considérer que le risque de décès est de 1 %, quel que soit le sexe, après une dose aiguë de 1 Sv. L'incertitude de l'estimation peut être un facteur d'environ  $\pm 2$ . Étant donné la non-linéarité de la courbe dose-effet, la division de la dose par 10, qui la ramènerait donc de 1 Sv à 0,1 Sv, se traduirait par un risque sur toute la vie vingt fois plus faible si la dose est aiguë. Les risques de cancer solide et de leucémie sont en gros comparables aux estimations données dans le rapport de 1994.

86. Un cancer lié à l'irradiation qui frappe particulièrement les enfants est le cancer de la thyroïde. Tout porte à croire que le risque d'apparition de ce cancer diminue quand l'âge au moment de l'exposition augmente, de sorte qu'il est nettement plus élevé chez l'enfant de moins de 15 ans que chez l'adulte. Parmi les enfants, le groupe des 0-5 ans sont cinq fois plus sensible que le groupe des 10-14 ans. Il n'est donc pas surprenant que l'on ait observé un accroissement considérable du nombre de cancers de la thyroïde chez les enfants du Bélarus, de la Fédération de Russie et d'Ukraine après l'accident de Tchernobyl, en 1986: le taux d'incidence a décuplé entre 1991 et 1994 par rapport aux cinq années précédentes. En 1998, il y avait eu au total environ 1 800 cas. Cette question est examinée de façon approfondie dans l'annexe J du présent rapport, intitulée "Radioexpositions et effets de l'accident de Tchernobyl".

87. Un cancer peut être induit par une exposition prénatale. Chez l'être humain, l'induction de cancers, de leucémies et de cancers solides chez l'enfant à la suite d'une exposition aux rayons X a été signalée pour la première fois en 1958, lorsque l'Enquête d'Oxford a établi qu'il y avait une incidence accrue de tumeurs chez l'enfant au cours des 15 premières années de vie pour ceux qui avaient été exposés à des rayons X *in utero* par rapport à ceux qui ne l'avaient pas été. L'imputation de cet accroissement à la radioexposition a toutefois été critiquée par certains au motif que les femmes exposées avaient peut-être des affections médicales ou d'autres troubles permettant d'expliquer la hausse des taux de cancer. D'autres études soutiennent le rôle causal des rayonnements, et le risque, s'il est réel, a été estimé à environ 5 % par Sv. On n'a pas observé de tels effets chez les survivants des bombardements atomiques irradiés *in utero*.

88. Les risques de cancer induits qui se concrétisent à l'âge adulte chez des sujets exposés *in utero* sont plus difficiles à évaluer. Néanmoins, le fait que, parmi les

survivants des bombardements atomiques, les risques relatifs augmentent d'autant plus que le sujet était plus jeune au moment de l'exposition donnent à craindre que les sujets exposés *in utero* soient plus sensibles à l'induction de cancer que ceux qui ont été exposés dans leur enfance. Les survivant exposés *in utero* ont aujourd'hui 55 ans; il est donc particulièrement important d'évaluer leur risque de cancer dans l'avenir.

## Chapitre V

### L'accident de Tchernobyl

89. Le Comité s'est particulièrement intéressé à l'accident survenu au réacteur nucléaire de Tchernobyl le 26 avril 1986. Cet accident est le plus grave qui se soit jamais produit dans l'industrie nucléaire. Le réacteur a été détruit, de grandes quantités de matières radioactives ont été rejetées dans l'environnement et de nombreux travailleurs ont été exposés à des doses élevées de rayonnement qui ont eu des conséquences sanitaires graves, voire fatales (voir ci-dessous). Parmi les résidents du Bélarus, de la Fédération de Russie et de l'Ukraine, plus d'un millier de cas de cancer de la thyroïde (environ 1 800) ont été signalés chez les enfants. Malgré les problèmes de dépistage, ces cancers ont sans doute eu pour cause les rayonnements ionisants reçus au moment de l'accident. Beaucoup d'autres problèmes de santé ont été observés dans les populations, mais il est moins probable qu'ils soient liés à la radioexposition. D'un point de vue scientifique, il est nécessaire d'évaluer et de comprendre les causes techniques et les effets de l'accident. D'un point de vue humain, il y a aussi une obligation de fournir une analyse objective des conséquences de l'accident pour la santé des populations concernées. Avec ces deux objectifs présents à l'esprit, le Comité a préparé une nouvelle évaluation de l'accident.

90. Peu après l'accident, le dépôt des radionucléides dispersés et les expositions qui en ont résulté ont été mesurés et évalués dans toute la région touchée. Le Comité a utilisé ces données pour évaluer les doses moyennes individuelles et collectives pour les différents pays et régions et pour l'ensemble de l'hémisphère nord. Les résultats ont été présentés à l'annexe D de son rapport de 1988, intitulée "Irradiations constatées après l'accident de Tchernobyl". L'expérience acquise lors du traitement des radiolésions immédiates des travailleurs et des pompiers a également été analysée dans l'appendice à l'annexe G du même rapport.

91. L'évaluation des doses reçues par les personnes qui ont été évacuées ou qui résident encore dans les zones les

plus touchées par l'accident a demandé beaucoup de temps et d'efforts. Les premières mesures doivent être complétées par des informations sur des éléments tels que l'emplacement et le régime alimentaire des individus dans chaque localité. L'acquisition de données sur les effets sanitaires tardifs a également demandé du temps. Ce n'est qu'aujourd'hui, une quinzaine d'années après l'accident, que l'on peut procéder à une première évaluation des expositions et des effets au niveau local. Les résultats détaillés de l'évaluation du Comité sont présentés à l'annexe J du présent rapport, intitulée "Irradiation et conséquences de l'accident de Tchernobyl".

#### A. Rejet de radionucléides

92. L'accident du réacteur de Tchernobyl s'est produit lors d'un essai expérimental du système de commande électrique alors que le réacteur était mis à l'arrêt pour un entretien de routine. En violation des règles de sécurité, les opérateurs avaient débranché d'importants systèmes de contrôle et laissé le réacteur en état instable à faible puissance. Une brusque montée de puissance a provoqué une explosion de vapeur qui a entraîné une rupture de la cuve du réacteur, permettant des interactions combustible-vapeur violentes qui ont détruit le cœur du réacteur et gravement endommagé le bâtiment qui l'abritait.

93. On rappellera qu'un accident survenu en 1979 au réacteur de Three Mile Island, aux États-Unis d'Amérique, avait lui aussi fortement endommagé le cœur du réacteur, mais sans explosion de vapeur. Le bâtiment réacteur avait toutefois empêché le rejet de gaz radioactifs, si ce n'est en infimes quantités. Le réacteur de Tchernobyl n'avait pas d'enceinte de confinement. À la suite des explosions, il y a eu un intense feu de graphite qui a duré 10 jours. Dans ces conditions, de grandes quantités de matières radioactives ont été libérées.

94. Les gaz radioactifs et les particules libérés lors de l'accident ont d'abord été transportés par le vent vers l'ouest et le nord. Les jours suivants, les vents sont venus de toutes les directions. Le dépôt de radionucléides a été provoqué principalement par les précipitations pendant le passage du nuage radioactif, ce qui a donné lieu à un schéma d'exposition complexe et variable pour l'ensemble de la région touchée.

#### B. Exposition des individus

95. Les principaux radionucléides rejetés par le réacteur qui ont provoqué l'irradiation des individus ont été

l'iode-131, le césium-134 et le césium-137. L'iode-131 a une période radioactive courte (huit jours), mais il peut être transféré à l'homme assez rapidement par l'air, le lait et les légumes à feuilles. Il se concentre dans la thyroïde. Les nourrissons et les enfants, du fait de leur alimentation ainsi que de la taille de leur thyroïde et de leur métabolisme, reçoivent généralement des doses plus élevées que les adultes.

96. Les isotopes du césium ont des périodes relativement longues (deux ans pour le césium-134 et 30 pour le césium-137). Ces radionucléides provoquent des expositions à long terme par ingestion et par irradiation externe du fait de leur dépôt sur le sol. De nombreux autres radionucléides ont été libérés au moment de l'accident et ils ont été pris en compte dans les évaluations de l'exposition.

97. Les doses moyennes aux personnes les plus touchées par l'accident ont été d'environ 100 mSv pour 240 000 travailleurs qui sont intervenus d'urgence, 30 mSv pour 116 000 personnes évacuées et 10 mSv pendant la première décennie qui a suivi l'accident pour les personnes qui ont continué de résider dans les zones contaminées. Il se peut que les doses maximales aient été dix fois plus élevées. En dehors du Bélarus, de la Fédération de Russie et de l'Ukraine, d'autres pays d'Europe ont été touchés. Les doses y ont été au maximum de 1 mSv la première année qui a suivi l'accident et ont progressivement diminué par la suite. La dose sur toute la vie a été estimée égale de deux à cinq fois à la dose au cours de la première année, ce qui est comparable à une dose annuelle du rayonnement naturel, et a donc peu d'importance radiologique.

98. Les expositions ont été beaucoup plus élevées pour ceux qui sont intervenus pour atténuer les effets de l'accident et pour les habitants du voisinage. Elles ont été examinées de façon très détaillée dans l'évaluation du Comité.

### C. Effets sur la santé

99. L'accident de Tchernobyl a eu des effets radiologiques graves presque immédiatement. Sur les 600 ouvriers présents sur le site le matin du 26 avril 1986, 134 ont reçu des fortes doses (0,7-13,4 Gy) et ont souffert du mal des rayons. Vingt-huit d'entre eux sont morts dans les trois mois et deux autres peu après. En outre, en 1986 et 1987, environ 200 000 ouvriers affectés aux opérations de remise en état ont reçu des doses allant de 0,01 Gy à 0,5 Gy. Il existe pour les individus de cette cohorte un

risque potentiel de conséquences tardives telles que cancer et autres maladies, et leur état de santé sera suivi de près.

100. L'accident de Tchernobyl a également provoqué la contamination radioactive de vastes régions du Bélarus, de la Fédération de Russie et de l'Ukraine où vivent plusieurs millions de personnes. En outre, il a entraîné des bouleversements à long terme de la vie des populations des zones contaminées, car les mesures prises pour limiter leur exposition ont consisté à les réinstaller, à modifier les réseaux d'approvisionnement alimentaire et à restreindre les activités des individus et des familles. À ces changements sont venus s'ajouter plus tard les profonds bouleversements économiques, sociaux et politiques qui se sont produits lors de la désintégration de l'Union soviétique.

101. Au cours des 14 dernières années, on s'est employé à étudier le lien entre l'exposition imputable aux radionucléides libérés lors de l'accident de Tchernobyl et les effets tardifs, en particulier le cancer de la thyroïde chez l'enfant. La majorité des études achevées à ce jour sont descriptives et établissent une corrélation entre les expositions moyennes de la population et les taux moyens d'incidence du cancer au cours de certaines périodes. En l'absence de données dosimétriques individuelles, il est difficile de déterminer si les effets sont liés aux rayonnements et il est impossible de faire des estimations quantitatives fiables du risque. La reconstruction des doses individuelles est le préalable indispensable à toute recherche future sur les cancers liés aux rayonnements à la suite de l'accident de Tchernobyl.

102. Le nombre de cancers de la thyroïde (environ 1 800) chez les individus exposés dans l'enfance, en particulier dans les zones fortement contaminées des trois pays touchés, est beaucoup plus élevé qu'on aurait pu s'y attendre sur la base des connaissances antérieures. Cette incidence élevée et la courte période d'induction sont inhabituelles. Il se peut que d'autres facteurs influent sur le risque. Si la tendance actuelle se maintient, on observera probablement des cancers de la thyroïde supplémentaires, en particulier chez les personnes exposées à un jeune âge.

103. À part un nombre accru de cancers de la thyroïde chez les personnes irradiées dans l'enfance, on n'a pas observé d'augmentation de l'incidence globale du cancer ni de la mortalité pouvant être attribuée aux rayonnements ionisants. Le risque de leucémie, qui est un des principaux sujets de préoccupation (la leucémie est la première forme de cancer à apparaître après une irradiation, en raison de sa courte période de latence, de deux à dix ans), ne semble pas élevé, même parmi les travailleurs chargés des

opérations de remise en état. Il n'y a pas non plus de preuve d'autres troubles non malins liés aux rayonnements ionisants. En revanche, il y a eu de nombreuses réactions psychologiques, dues à la crainte des rayonnements, et non aux doses effectives d'irradiation.

104. Il y a une tendance à attribuer l'augmentation de l'incidence de tous les cancers, au cours du temps, à l'accident de Tchernobyl, mais il faut noter que des augmentations étaient déjà observées avant l'accident dans les zones touchées. En outre, une hausse générale de la mortalité a été signalée ces dernières années dans la plupart des régions de l'ex-Union soviétique, et il faut en tenir compte lors de l'interprétation des résultats des études portant sur Tchernobyl.

105. Dans l'état actuel des connaissances, on connaît mal les effets tardifs d'une exposition prolongée aux rayonnements ionisants, du fait que les évaluations de la courbe dose-effet repose en grande partie sur des études d'exposition à de fortes doses et à des expériences sur l'animal; il faut donc faire des extrapolations qui comportent toujours un élément d'incertitude. L'accident de Tchernobyl pourrait permettre de mieux comprendre les effets tardifs d'une exposition prolongée, mais étant donné le faible niveau des doses reçues par la majorité des personnes exposées, toute augmentation de l'incidence des cancers ou de la mortalité sera difficile à détecter dans les études épidémiologiques. Il faudra impérativement, dans l'avenir, établir des estimations des doses individuelles, ainsi que des estimations de l'incertitude, et déterminer les effets de doses accumulés sur une longue période.

#### Notes

<sup>1</sup> 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, en 1955. Son mandat est défini dans la résolution 913 (X) du 3 décembre 1955. Le Comité comprenait à l'origine les États Membres suivants: Argentine, Australie, Belgique, Brésil, Canada, Égypte, États-Unis d'Amérique, France, Inde, Japon, Mexique, Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord, 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 États 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.

<sup>2</sup> Pour les précédents rapports de fond du Comité à l'Assemblée générale voir: *Documents officiels de l'Assemblée générale, treizième session, Supplément n° 17* (A/3838); *ibid., dix-septième session, Supplément n° 16* (A/5216); *ibid., dix-neuvième session, Supplément n° 14* (A/5814); *ibid., vingt et unième session, Supplément n° 14* (A/6314 et Corr.1); *ibid., vingt-quatrième session, Supplément n° 13* (A/7613 et Corr.1); *ibid., vingt-septième session, Supplément n° 25* (A/8725 et Corr.1); *ibid., trente-deuxième session, Supplément n° 40* (A/32/40); *ibid., trente-septième session, Supplément n° 45* (A/37/45), *ibid., quarante et unième session, Supplément n° 16* (A/41/16); *ibid., quarante-troisième session, Supplément n° 45* (A/43/45); *ibid., quarante-huitième session, Supplément n° 46* (A/48/46); *ibid., quarante-neuvième session, Supplément n° 46* (A/49/46); *ibid., cinquante et unième session, Supplément n° 46* (A/51/46). Ces documents sont mentionnés comme rapports de 1958, de 1962, de 1964, de 1966, de 1969, de 1972, de 1977, de 1982, de 1986, de 1988, de 1993, de 1994 et de 1996, respectivement. Le rapport de 1972 a également été publié avec ses annexes scientifiques sous le titre: *Les rayonnements ionisants: Niveaux et effets, Volume I: Niveaux et volumes et Volume II: Effets* (publication des Nations Unies, numéro de vente: F.72.IX.17 et 18). Le rapport de 1977, 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). Les rapports de 1993, de 1994 et de 1996 avec leurs annexes scientifiques ont été publiés sous le titre: *Sources and Effects of Ionizing radiation* (publication des Nations Unies, numéros de vente E.94.IX.2, E.94.IX.11 et E.96.IX.3, respectivement).



## Appendice I

### Liste des membres des délégations nationales qui ont assisté aux quarante-quatrième à quarante-neuvième sessions

Allemagne	W. Burkart (Représentant), U. Ehling, W. Jacobi, T. Jung, A. Kaul (Représentant), A. Kellerer, J. Kiefer, J. Kirchner, W. Köhnlein, C. Reiners, F. E. Stieve, C. Streffer
Argentine	D. Beninson (Représentant), E. D'Amato, D. Cancio
Australie	P. A. Burns (Représentant), K. H. Lokan (Représentant), J. Loy, D. I. Macnab
Belgique	J. R. Maisin (Représentant), A. Debauche, R. Kirchmann, H. P. Leenhouts, J. Lembrechts, K. Sankaranarayanan, P. Smeesters, J. van Dam, H. Vanmarcke, A. Wambersie
Brésil	J. L. Lipsztein (Représentant), D. Melo, A. T. Ramalho, E. R. Rochedo
Canada	R. M. Chatterjee (Représentant), D. B. Chambers, R. J. Cornett, N. E. Gentner (Représentant), R. V. Osborne (Représentant), S. Vlahovich (Représentant)
Chine	Z. Pan (Représentant), N. Gu, F. He, Q. He, J. Ma, B. Mao, K. Li, P. Liu, Y. Song, Z. Tao, K. Wei, B. Xiu, H. Yang, L. Zhang, Y. Zhao, J. Zhou, B. Zhu
Égypte	A. M. El-Naggar (Représentant), F. Hammad (Représentant), M. A. Gomaa
États-Unis d'Amérique	F. A. Mettler (Représentant), L. Anspaugh, J. D. Boice Jr., N. H. Harley, E. V. Holahan, C. B. Meinhold, R. J. Preston, P. B. Selby, W. K. Sinclair
Fédération de Russie	L. A. Ilyin (Représentant), R. M. Alexakhin, L. A. Buldakov, K. I. Gordeev, A. K. Guskowa, J. B. Kholina, I. S. Koshkin, I. I. Kryshev, I. I. Kulyeshov, B. K. Lobach, O. A. Pavlovski, M. N. Savkin, V. A. Shevchenko
France	J. F. Lacronique (Représentant), A. Aurengo, M. Bourguignon, A. Flüery-Hérard, J. Lallemand, C. Luccioni, R. Masse (Représentant), J. Piéchowski, A. Rannou
Inde	K. B. Sainis (Représentant), P. C. Kesavan (Représentant)
Indonésie	K. Wiharto (Représentant), T. Suprihadi, S. Zahir
Japon	Y. Sasaki (Représentant), T. Asano, H. Iizuka, T. Isoyama, S. Kumazawa, S. Mizushita, K. Morita, Y. Muramatsu, N. Nakagawa, J. Onodera, K. Sato, T. Sato, Y. Taguchi, K. Tatsumi
Mexique	J. R. Ortiz-Magaña (Représentant), E. Araico (Représentant)

Pérou	L. V. Pinillos-Ashton (Représentant)
Pologne	Z. Jaworowski (Représentant), M. Waligorski
Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord	R. H. Clarke (Représentant), H. J. Dunster, V. Beral, F. A. Fry, J. W. Stather
Slovaquie	D. Viktory (Représentant), I. Bučina, P. Gaál, E. Kunz
Soudan	K.E.H. Mohamed (Représentant), O. I. Elamin (Représentant)
Suède	L.-E. Holm (Représentant), E. Bongtsson (Représentant), U. Bäverstam, L. Moberg, W. Leitz, J. O. Snihs

## Appendice II

### Liste des fonctionnaires scientifiques et des consultants qui ont collaboré avec le Comité à l'élaboration du présent rapport

L. Anspaugh  
B. Bennett  
A. Bouville  
W. Burkart  
R. Cox  
J. Croft  
P. Hall  
H. Leenhouts  
C. Muirhead  
E. Ron  
M. Savkin  
P. Shrimpton  
J. Stather  
J. Thacker  
A. Wrixon

V.00-55157

00-58721 (F) 030800 070800