RAPPORT DU COMITÉ SCIENTIFIQUE DES NATIONS UNIES POUR L'ÉTUDE DES EFFETS DES RAYONNEMENTS IONISANTS

ASSEMBLÉE GÉNÉRALE

DOCUMENTS OFFICIELS : QUARANTE-TROISIÈME SESSION

SUPPLÉMENT N° 45 (A/43/45)

NATIONS UNIES

New York, 1988

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

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.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

[Original : anglais]
[1er août 1988]

TABLE DES MATIERES

		Paragraphes	Pages
I.	INTRODUCTION	1 - 7	1
II.	EXAMEN RETROSPECTIF	8 - 135	3
	A. Considérations d'ordre général	8 - 10	3
	B. Notions, grandeurs et unités	11 - 41	3
	1. Activité	12 - 14	4
	2. Dose de rayonnement	15 - 24	4
	3. Evolution des notions dosimétriques	25 - 41	6
	a) La dose génétiquement significative	26	6
	b) La dose moyenne à la moelle osseuse	27	6
	c) L'engagement de dose	28 - 30	7
	d) Doses collectives et engagements de dose collective	31 - 32	9
	e) Coefficients de transferts	33 - 34	8
	f) Organes étudiés	35 - 36	8
	g) L'équivalent de dose efficace	37 - 41	8
	C. Evaluation des doses	42 - 85	10
	1. Sources naturelles de rayonnements	42 - 44	10
	2. Explosions nucléaires	45 - 56	10
	3. Production d'énergie d'origine nucléaire	57 - 62	13
	4. Radioexpositions à de fins médicales	63 - 70	14
	5. Radioexpositions professionnelles	71 - 76	16
	6. Radioexpositions diverses	77 - 80	18
	7. Accidents et incidents	81 - 85	19

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

TABLE DES MATIERES

	Paragraphes	Pages
D. Evaluation du risque	86 - 135	20
1. Dommage héréditaire	86 - 95	20
2. Cancer	96 - 116	25
3. Effets non stochastiques	117 - 127	30
a) Irradiation de l'adulte	117 - 121	30
b) Irradiation prénatale	122 - 127	31
4. Autres types de dommage	128 - 135	32
III. SITUATION ACTUELLE	136 - 270	35
A. Niveaux et doses de rayonnement	137 - 185	35
1. Sources naturelles de rayonnement	137 - 141	35
2. Explosions nucléaires	142 - 145	37
3. Production d'énergie d'origine nucléaire	146 - 159	39
4. Radioexpositions à des fins médicales	160 - 166	42
5. Radioexpositions professionnelles	167 - 169	43
6. Expositions diverses	170	44
7. Accidents	171 - 173	44
8. L'accident de Tchernobyl	174 - 185	45
B. Effets des rayonnements	186 - 232	47
1. Dommage héréditaire	186 - 191	47
2. Radiocancérogénèse chez l'homme	192 - 210	52
3. Effets précoces de doses élevées de rayonnement chez l'homme	211 - 229	57
4. Effets de l'irradiation prénatale	230 - 232	61
C. Calcul des coefficients de risque	233 - 252	61
1. Dommage héréditaire	237 - 243	62

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

TABLE DES MATIERES

	Paragraphes	Pages
2. Cancer	244 - 252	64
a) Risque individuel lié au tissu	246 - 250	64
b) Détriment collectif	251 - 252	66
D. Comparaison des expositions	253 - 270	66
1. Précédentes comparaisons du Comité	253 - 256	66
2. Objet des comparaisons	257	67
3. Comparaison des doses collectives	258 - 259	68
4. Comparaison de doses individuelles	260 - 261	68
5. Bilan des comparaisons de dose	262 - 264	68
6. Comparaison directe des détriments	265 - 270	70

APPENDICES

I. Liste des membres des délégations nationales qui ont pris part aux trente et unième à trente-septième sessions du Comité 73

II. Liste des fonctionnaires scientifiques et des consultants qui ont collaboré avec le Comité à l'élaboration du rapport 75

III. Liste des rapports reçus par le Comité 76

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

I. INTRODUCTION

1. Le présent document est le dixième d'une série de rapports techniques du Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR) 1/ à l'Assemblée générale 2/. L'élaboration du présent rapport et de ses annexes scientifiques s'est déroulée de la trente et unième à la trente-septième session du Comité. Sa substance a été mise au point aux sessions annuelles du Comité à partir des documents de travail préparés par le secrétariat et modifiés et corrigés d'une session à l'autre à la demande du Comité. Parallèlement au présent rapport, un autre rapport, qui contient huit annexes scientifiques, a été établi à la trente-cinquième session du Comité. Les deux rapports, désignés par les appellations "rapport de 1986" et "rapport de 1988" constituent la dernière évaluation complète des sources, effets et risques des rayonnements ionisants faite par le Comité.

2. Les membres du Comité dont les noms suivent ont rempli respectivement les fonctions de président, vice-président et rapporteur lors des sessions ci-après : trente et unième session : Z. Jaworowski (Pologne), D. Beninson (Argentine) et T. Kumatori (Japon); trente-deuxième et trente-troisième sessions : D. Beninson (Argentine), T. Kumatori (Japon) et A. Hidayatalla (Soudan); trente-quatrième et trente-cinquième sessions : T. Kumatori (Japon), A. Kaul (République fédérale d'Allemagne) et A. Hidayatalla (Soudan); trente-sixième et trente-septième sessions : B. Lindell (Suède), K. H. Lokan (Australie) et J. Maisin (Belgique). On trouvera à l'appendice I la liste des experts qui ont pris part aux travaux menés de la trente et unième à la trente-septième session du Comité en leur qualité de représentants ou membres des délégations nationales.

3. Le Comité, qui par son approbation du présent rapport en assume l'entière responsabilité, tient à remercier de leur concours et de leurs avis un petit groupe de consultants qui ont été désignés par le Secrétaire général et ont aidé à l'élaboration du corps du rapport et de ses annexes scientifiques. Leurs noms figurent à l'appendice II. Ils étaient chargés de l'examen et de l'évaluation préliminaires des données techniques communiquées au Comité ou disponibles dans les publications scientifiques et qui servent de base au Comité lors de ses délibérations finales. Divers organismes internationaux et nationaux ont offert une assistance supplémentaire et un appui financier au Comité pour l'élaboration de certaines des annexes scientifiques. Le Comité tient à exprimer sa gratitude à ces organismes dont la liste figure dans les annexes correspondantes.

4. Des représentants du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) et de la Commission internationale des unités et des mesures de radiologie (CIUMR) ont assisté aux sessions du Comité au cours de la période considérée. Le Comité tient à les remercier de la part qu'ils ont prise aux débats.

5. On trouvera à l'appendice III la liste des rapports que le Comité a reçus, entre le 19 avril 1986 et le 17 juin 1988, des Etats Membres de l'Organisation des Nations Unies, des membres des institutions spécialisées et de l'AIEA, ainsi que de ces organisations elles-mêmes. Les rapports reçus avant le 19 avril 1986 sont énumérés dans les précédents rapports du Comité à l'Assemblée générale. Ces documents ont été communiqués officiellement au Comité et complétés par d'abondantes données tirées de publications scientifiques, qui ont servi à les interpréter. Dans quelques rares cas, le Comité a utilisé des communications scientifiques inédites.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

6. Dans le rapport ci-après, le Comité résume les principales conclusions des études entreprises dans des domaines particuliers; il le fait également à la lumière de documents scientifiques publiés antérieurement. Le contenu est présenté sous la forme la plus générale possible en raison de la difficulté des notions et des appréciations qui caractérise ce domaine. Après un chapitre récapitulant les principales évolutions et tendances qui se sont dégagées au fil des ans, le corps du rapport souligne les faits saillants et les conclusions à tirer des études les plus récentes dans les domaines de la radiophysique et de la radiobiologie. Le corps du rapport est suivi des annexes scientifiques qui l'étayent et sont rédigées sous une forme et dans un langage destinés avant tout à des spécialistes.

7. Conformément à l'usage établi, seul le corps du rapport est soumis à l'Assemblée générale, alors que le rapport complet avec ses annexes scientifiques fera l'objet d'une publication des Nations Unies. Cet usage vise à assurer une large diffusion des conclusions au profit de la communauté scientifique internationale. Le Comité tient à appeler l'attention de l'Assemblée générale sur le fait que le rapport proprement dit n'est séparé de ses annexes que par simple souci de commodité. Il va de soi que les données scientifiques contenues dans les annexes sont d'une grande importance puisqu'elles constituent les bases sur lesquelles reposent les conclusions du rapport.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

II. EXAMEN RETROSPECTIF

A. Considérations d'ordre général

8. Tout au long de ses 33 années d'existence, le Comité s'est résolument employé à fournir les meilleures estimations possibles :

a) Des doses que la population mondiale a reçues globalement dans le passé et qu'elle est censée recevoir dans le futur, de diverses sources naturelles et artificielles de rayonnement;

b) Du risque d'induction de divers types de dommage dû aux rayonnements, tant dans le court que dans le long terme, chez des individus recevant directement ces doses ou chez leurs descendants sur de nombreuses générations.

9. Avec le temps et l'accroissement du nombre et de la complexité des rapports publiés par le Comité, il devient de plus en plus difficile, serait-ce pour des spécialistes, de saisir en remontant jusqu'aux premières publications comment ont évolué et se sont successivement modifiées les principales notions sous-jacentes aux évaluations du Comité à mesure que se multipliaient les connaissances scientifiques. Il semblerait donc utile de livrer, sous une forme concise et dense, les principales conclusions qui se sont dégagées dans les domaines susmentionnés. Cet exposé succinct sera utile à plusieurs égards. En premier lieu, il informera l'Assemblée générale des travaux que le Comité a accomplis et des conclusions auxquelles il est parvenu; en second lieu, il permettra aux membres du Comité, dont la composition s'est modifiée progressivement au cours des années, de suivre l'évolution de la pensée du Comité. Enfin, il sera à la disposition de la communauté scientifique internationale qui utilise les rapports et annexes scientifiques du Comité comme référence de base.

10. Le présent chapitre va donc récapituler l'évolution des évaluations du Comité dans les domaines de l'estimation des doses (qui se rapporte plus étroitement à des questions de physique) et de l'évaluation du risque (où interviennent des considérations tant physiques que radiobiologiques et médicales). Il vise à exposer les principes généraux qui sous-tendent les évaluations et les conclusions qui ont été formulées, en le faisant dans un langage aussi clair que le permet la complexité des sujets abordés, sans trop s'attarder sur les discussions qui ont étayé les choix opérés à tel ou tel moment. A cet effet, et pour d'autres détails techniques ou méthodologiques, il sera fait référence aux rapports à l'Assemblée générale publiés de 1958 à 1986. Une liste complète de ces publications du Comité figure à la note 2/ du paragraphe 1 du présent rapport. Les évaluations font l'objet d'un examen plus détaillé au chapitre III.

B. Notions, grandeurs et unités

11. Le rayonnement est un transport d'énergie dans l'espace. En traversant un matériau, l'énergie irradiée est absorbée. Dans le cas des rayonnements qui intéressent le Comité, à savoir les rayonnements ionisants, le processus d'absorption consiste dans l'enlèvement d'électrons des atomes, qui se traduit par la création d'ions. Les rayonnements ionisants peuvent être produits artificiellement - par exemple dans des tubes Röntgen - ou encore provenir de la désintégration de nucléides radioactifs, phénomène connu sous le nom de radioactivité. Des nucléides de ce type existent dans la nature mais ils peuvent également être produits artificiellement, notamment dans des réacteurs nucléaires.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

Les deux grandeurs fondamentales de l'évaluation des niveaux et des effets de rayonnements sont l'activité d'une matière radioactive et la dose de rayonnements. Le Comité utilise le système de grandeurs et d'unités radiologiques qui a été adopté en 1980 par la CIUMR.

1. Activité

12. L'activité d'une matière radioactive est le nombre de désintégrations nucléaires par unité de temps. L'unité que le Comité a utilisée pour cette grandeur jusqu'au rapport de 1977 inclus était le curie (Ci) qui équivaut à 37 milliards ($3,7 \times 10^{10}$) de désintégrations par seconde, nombre adopté à l'origine parce qu'il correspond à l'activité de 1 gramme de radium-226.

13. L'unité d'activité dont on se sert désormais a reçu le nom spécial de becquerel (Bq). Un becquerel équivaut à une désintégration par seconde.

14. Le mot "radioactivité" désigne le phénomène de la désintégration radioactive. Il n'est pas synonyme d'"activité" ni ne devrait être employé au sens de "matière radioactive".

2. Dose de rayonnement

15. Le terme "dose de rayonnement" peut avoir plusieurs significations (dose absorbée, équivalent de dose ou équivalent de dose efficace). La dose absorbée de rayonnement est l'énergie cédée par unité de masse d'un matériau irradié. Jusqu'au rapport de 1977, le Comité utilisait le rad comme unité de dose absorbée (1 rad = 0,01 joule/kg). A présent, l'unité de dose absorbée est le joule/kg pour laquelle on utilise le nom spécial de gray (Gy). Ainsi, 1 rad = 0,01 joule/kg = 0,01 Gy.

16. Des types différents de rayonnement peuvent avoir une efficacité biologique relative (EBR) différente. L'EBR d'un rayonnement par rapport à un rayonnement de référence (généralement le rayonnement X ou gamma) est le rapport inverse des doses absorbées des deux rayonnements nécessaires pour occasionner le même degré de l'effet biologique pour lequel l'EBR est fournie.

17. Quand les premiers rapports de l'UNSCEAR ont été établis, la CIPR a recommandé certaines valeurs de EBR aux fins de la radioprotection. Si l'on multipliait par ces valeurs la dose absorbée de divers rayonnements, on obtenait une dose pondérée aux fins de la radioprotection (par exemple, pour la comparaison avec les limites de dose). L'unité de cette dose absorbée pondérée a été appelée le rem.

18. L'emploi du terme EBR tant en radioprotection (où il désignait seulement les valeurs types recommandées par la CIPR) qu'en radiobiologie (où il désignait la valeur la plus probable dans des conditions d'irradiation données et pour un effet biologique spécifié) a posé certains problèmes. La CIPR et la CIUR ont donc décidé d'instituer une nouvelle grandeur, l'équivalent de dose. Il s'agit du produit de la dose absorbée par un facteur dit "de qualité" (d'abord désigné par FQ, puis par Q) et il a pour unité le rem. La CIPR a communiqué un facteur de qualité fonction de la capacité propre à chaque rayonnement de produire des ionisations, exprimée en transfert linéique d'énergie (TLE). A des fins d'application pratique, la CIPR a suggéré qu'il suffirait d'utiliser des approximations de valeurs moyennes, soit une valeur unique de FQ (ou Q) pour chaque type de rayonnement. Il a proposé les valeurs ci-après : Q = 1 pour les rayons X et gamma et les particules bêta; Q = 10 pour les neutrons rapides (converti en Q = 20 en 1985); Q = 10 pour

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

les particules alpha (converti en Q = 20 en 1977) et Q = 20 pour les particules lourdes. Le Comité a également utilisé ces facteurs mais a continué à utiliser l'approximation Q = 10 pour les neutrons rapides.

19. Dans les rapports du Comité, quand les "doses" ont été exprimées en rems, les valeurs CIPR de l'EBR (protection) et de FQ (ou Q) ont le plus souvent été utilisées, mais si des auteurs sont cités pour des "doses" en rems, il se peut qu'ils aient calculé celles-ci en appliquant FQ (ou Q) pris dans sa définition initiale qui le rapporte au TLE.

20. Quand, en 1982, le Comité a adopté le nouveau système international d'unités et que la dose absorbée a été communiquée en grays (Gy) et non plus en rads, l'unité d'équivalent de dose s'est alors appelée le sievert (Sv).

21. En plus de la dose absorbée et de l'équivalent de dose, il existe une troisième grandeur dont il peut être question lorsqu'un auteur parle de "dose de rayonnement" : il s'agit de l'exposition. L'exposition est la charge électrique totale d'ions du même signe produite dans l'air par les électrons libérés par des rayons X ou gamma par masse unitaire d'air irradié. Etant une mesure de l'ionisation produite dans l'air par un rayonnement X ou gamma, l'exposition n'est donc applicable qu'à ces deux types de rayonnement. L'unité d'exposition est le coulomb/kg, bien que l'ancienne unité, le röntgen (R), soit encore en usage, 1 R = 2,58 x 10^{-4} coulombs/kg. Dans le présent rapport, le terme "exposition" est également utilisé dans son sens habituel pour désigner le fait d'être exposé à quelque chose, comme par exemple une source de rayonnements.

22. Dans cette acception, l'exposition à des produits de la désintégration du radon peut être exprimée de deux manières différentes : soit comme la quantité de produits inhalés, compte tenu de leur capacité d'émettre une énergie rayonnante, soit comme le produit de la durée de l'inhalation par la concentration des produits dans l'air inhalé. L'énergie alpha potentielle des produits inhalés peut être exprimée simplement en joules (J). La concentration d'énergie potentielle alpha est exprimée en J/m^3 ou dans l'ancienne unité - le niveau d'activité (NA) -, un NA équivalent à 2,08 10^{-5} J/m^3. Pour le radon en équilibre avec le produit de la désintégration, cela correspondrait à une concentration de 3,700 Bq/m^3. L'exposition aux produits de la désintégration est normalement exprimée en mois de niveau d'activité (MNA) ou encore, comme cela se fait communément aujourd'hui en Bq h/m^3.

23. Dans son rapport de 1958, le Comité employait le mot "dose" dans un sens assez large, et la grandeur signifiée était à inférer des unités dans lesquelles on communiquait les doses (röntgen, rad et rem). Dans le rapport de 1962, les doses étaient également exprimées tantôt en rads tantôt en rems. Les cinq rapports suivants, jusqu'en 1977, ont été marqués cependant par une approche plus rigoureuse. La dose absorbée a été systématiquement utilisée et on a évité délibérément de recourir à l'équivalent de dose. La raison majeure en était que les données physiques et biologiques offraient, entre autres utilités, une base pour estimer l'EBR et, partant, pour estimer aussi si les valeurs recommandées pour Q s'appliquaient bien. Présenter les doses en équivalents de dose serait revenu à présumer la question résolue. Parfois, les expositions étaient pourtant indiquées en röntgens puisqu'elles étaient exprimées ainsi dans les données originelles.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

24. Avec le rapport de 1982, la pratique a changé. En raison de la part grandissante prise par l'évaluation du risque dans ses préoccupations, le Comité ne pouvait plus se contenter de la simple notification des niveaux de dose absorbée, d'autant qu'on recueillait sans cesse de nouveaux éléments sur le cancer du poumon induit par les produits de filiation du radon et sur la forte concentration de ceux-ci à l'intérieur des bâtiments. Auparavant, les contributions de dose des types de rayonnements dont l'EBR différait de l'unité par rapport au rayonnement gamma n'avaient pas été jugées importantes et l'on estimait qu'il suffisait de communiquer les doses absorbées. On avait désormais affaire à une situation différente : il apparaissait que l'équivalent de dose était une grandeur conçue aux fins de la protection radiologique et que les valeurs de Q recommandées par la CIPR pouvaient être différentes des valeurs réelles de l'EBR, mais on continuait d'estimer que l'équivalent de dose fournissait une meilleure indication du risque que ne le faisait la dose absorbée.

3. Evolution des notions dosimétriques

25. On trouvera aux paragraphes 25 à 41 un aperçu historique de l'évolution des autres notions et grandeurs utilisées par le Comité. Au moment de l'établissement du rapport de 1958, deux effets biologiques s'imposaient à l'attention : la leucémie et le dommage génétique. D'où la priorité accordée au calcul de la dose délivrée aux tissus cibles pertinents, à savoir la moelle osseuse et les gonades. Dans ce dernier cas, il était patent que la dose ne conviendrait à l'évaluation du risque que si elle était calculée pour des individus assez jeunes pour envisager une descendance. Dans le cas de la moelle osseuse, il s'agissait de savoir laquelle de la dose moyenne ou de la dose maximale serait pertinente : l'examen de cette question a débouché sur la notion de "dose moyenne à la moelle osseuse".

a) La dose génétiquement significative

26. On s'était rendu compte de bonne heure que, pour la majorité de la population, les applications médicales des rayons X étaient la principale source d'exposition artificielle. Mais comme la distribution de la dose chez un patient est très inégale, l'évaluation de la dose s'avère malaisée. En outre, la composition par âge des groupes de patients soumis aux expositions à des fins médicales n'est pas la même que pour l'ensemble de la population. C'est pourquoi le Comité a recouru à la notion de dose génétiquement significative (DGS) qu'il a définie comme "la dose qui, si elle était délivrée à chaque membre de la population, entraînerait le même dommage génétique total parmi la population que le font les doses réelles délivrées à différents individus". Se fondant sur cette définition, le Comité a mis au point une formule et une méthode d'évaluation de la dose génétiquement significative imputable à divers types d'examens radiologiques. Cette question fait l'objet d'un exposé détaillé dans les rapports de 1958, 1962 et 1972.

b) La dose moyenne à la moelle osseuse

27. Postulant que la dose moyenne à la moelle osseuse active (rouge) serait la dose pertinente pour calculer le risque de leucémie et utilisant les données disponibles sur la distribution de la moelle osseuse active dans le squelette, le Comité a évalué cette grandeur pour divers types d'examens radiologiques. Il a été admis que cette grandeur ne conviendrait plus si la relation dose-réponse n'était pas que linéaire ou faisait apparaître une dose liminale. Mais l'on a également constaté que si la relation était linéaire et sans seuil, une autre quantité - la dose moyenne individuelle à la moelle osseuse dans une population - constituerait une grandeur utile. Le Comité l'a donc évaluée dans le rapport de 1958.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

c) L'engagement de dose

28. Les essais d'explosion nucléaire dans l'atmosphère ont introduit des éléments temporels distinguant cette source de rayonnement d'autres sources, comme les expositions médicales, puisque la période de l'irradiation n'était pas la même que celle de la pratique. Après chaque essai nucléaire, certains radionucléides de période longue produits par l'explosion restent présents dans la biosphère pendant de nombreuses années, occasionnant des radioexpositions. Au moment de l'établissement du rapport de 1958, il n'aurait pas été pleinement informatif de communiquer les doses annuelles imputables aux essais nucléaires réalisés jusque-là : en effet, ces données n'auraient pas fait apparaître que l'on s'attendait à une importante prolongation de la contamination impliquant pour l'humanité des radioexpositions dans les années à venir. Le rapport de 1958 illustrait la situation par des diagrammes qui indiquaient les prévisions en fonction des diverses hypothèses retenues quant à la durée des essais dans l'avenir.

29. Dans son rapport de 1962, le Comité a introduit la notion d'engagement de dose. L'engagement de dose imputable à une année de pratique est la somme des doses par habitant résultant inévitablement de l'exposition due à la contamination de l'environnement pendant les années à venir. Il en ressort que l'engagement de dose imputable à une année de pratique équivaut à la dose annuelle la plus élevée dans le futur si les essais se poursuivent indéfiniment à un rythme constant. Cette relation permet d'évaluer les conséquences de la poursuite des diverses pratiques.

30. Le rapport de 1964 a défini l'engagement de dose comme "l'intégrale sur le temps infini des débits de dose moyens dans un temps donné délivrés à la population mondiale par suite d'une pratique spécifique, par exemple une série donnée d'explosions nucléaires. Les irradiations effectives peuvent se produire des années après les explosions en cause et elles peuvent être délivrées à des individus qui n'étaient pas nés au moment de ladite pratique". Cette définition a été reprise dans les rapports suivants, une présentation mathématique plus rigoureuse étant adoptée dans ceux de 1969 et 1977. Il convient de relever que l'intégration des débits de dose moyens n'est pas effectuée sur un temps infini mais seulement sur un délai spécifié : on a donc affaire à des engagements de dose tronqués.

d) Doses collectives et engagements de dose collective

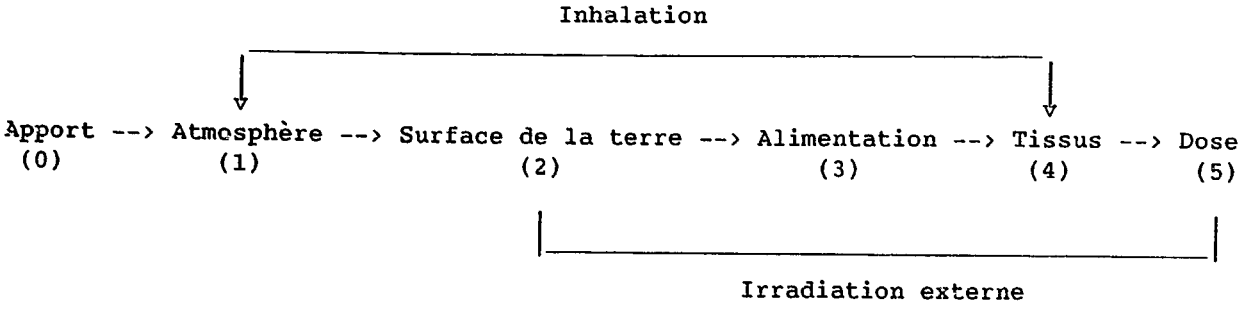
31. Le recours à l'engagement de dose ne met aucunement en jeu des hypothèses relatives à la forme de la relation dose-réponse aux faibles doses de rayonnement évaluées pour la contamination de l'environnement. Il s'agit simplement d'un procédé mathématique permettant d'ajouter des contributions inévitables à la dose.

32. Il est une autre notion, celle de la dose collective. Si l'on postule la proportionnalité entre les augmentations de dose et les augmentations du risque de dommage qui en résulte, le nombre prévu d'individus atteints du dommage est proportionnel à la dose collective, celle-ci étant définie comme le produit du nombre d'individus exposés par leur dose moyenne de rayonnement. Avant 1977, en raison des problèmes soulevés par l'incertitude quant à la forme de la relation dose-réponse, le Comité a hésité à évaluer les doses collectives. Dans son rapport de 1977, le Comité a néanmoins évalué les doses absorbées collectives dues à diverses sources et pratiques. Lorsqu'une pratique était censée occasionner des expositions pendant les années à venir, on évaluait l'engagement de dose collective. Il s'agit simplement de la dose collective totale attendue d'une pratique donnée sur l'ensemble du temps futur.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

e) Coefficients de transferts

33. Les engagements de dose imputables à des pratiques entraînant une contamination de l'environnement sont proportionnels à la quantité des radionucléides qui ont été libérés dans l'environnement. La méthode d'évaluation comporte une étude de la succession d'événements qui interviennent depuis l'injection initiale de matières radioactives dans l'atmosphère jusqu'à par exemple l'irradiation finale des tissus de l'organisme. Ce processus peut être schématisé comme suit :



34. Avec le rapport de 1969, le Comité a commencé à évaluer les coefficients de transfert, c'est-à-dire les rapports entre la grandeur intégrée dans le temps (par exemple, la concentration d'activité) après chaque étape de la succession d'événements et la grandeur intégrée correspondante avant cette étape. Ainsi, le coefficient de transfert P_{43} est la concentration d'activité intégrée dans le temps dans un tissu donné divisée par la concentration d'activité intégrée dans le temps du même nucléide dans l'alimentation. Le produit de tous les coefficients de transfert établit un rapport direct entre la quantité de matières radioactives injectée dans l'atmosphère et la dose qui en résulte. La formulation mathématique et la méthode d'évaluation de ces coefficients de transfert ont été décrites en détail dans le rapport de 1969.

f) Organes étudiés

35. Comme il a déjà été mentionné plus haut, dans son rapport de 1958, le Comité n'a établi les doses que pour deux tissus : les gonades et la moelle osseuse active. Il s'agissait à l'époque des seuls tissus pour lesquels on avait procédé à quelques estimations du risque. Le Comité ajouta dans son rapport de 1969 des évaluations de la dose pour un nouveau tissu, les cellules endostéales. Jusqu'en 1972, les évaluations de doses ont donc porté sur trois tissus (gonades, moelle osseuse et cellules endostéales), bien que le Comité eût en fait fourni des estimations de dose pour d'autres organes comme la thyroïde (1964 et 1972), le sein et le poumon (1972). Cette limitation s'expliquait, entre autres, par la complexité croissante qu'eût engendrée l'inclusion d'un plus grand nombre d'organes dans la présentation des évaluations, ce qui eût du même coup fortement compliqué les comparaisons entre les diverses sources.

36. Dans son rapport de 1977, le Comité a toutefois inclus un organe supplémentaire, le poumon, car il était devenu de plus en plus clair qu'une forte exposition aux produits de filiation du radon émetteurs de particules alpha dans les bâtiments étaient biologiquement importante et que le radon émanant des résidus du traitement du minerai d'uranium produisait des engagements de dose très élevés à long terme.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

g) L'équivalent de dose efficace

37. En 1977, la CIPR publia une version remaniée (CIPR, publication 26) de ses recommandations générales; elle y proposait que soit calculée une somme pondérée des équivalents de doses de rayonnements délivrées à la plupart des organes et tissus radiosensibles, ce qui servirait de base aux évaluations aux fins de la protection radiologique. Cette somme pondérée était désignée comme l'équivalent de dose efficace, et on lui attribuait la même unité qu'à l'équivalent de dose, à savoir le sievert. L'équivalent de dose efficace ne s'obtient qu'en appliquant les facteurs de pondération recommandés par la CIPR pour les divers organes sur la base des estimations de risque. Les autres types de sommes obtenues en appliquant des coefficients de pondération différents ne doivent pas être appelés équivalents de dose efficace.

38. L'équivalent de dose efficace était à l'origine destiné à rendre compte des risques relatifs aux divers organes pour un membre "moyen" d'une population active. Il attribuait un coefficient de pondération équivalent à l'apparition d'un dommage héréditaire grave dans les deux premières générations de la descendance d'un individu exposé et à celle d'un cancer létal chez ce même individu. Le coefficient de pondération était nul pour les cancers curables. Le concept était acceptable compte tenu de l'utilisation pour laquelle cette grandeur avait été établie. Mais cette même grandeur a donné lieu ultérieurement à une utilisation élargie dans l'évaluation des doses collectives délivrées à des membres du public. Pour de telles applications, l'utilisation de l'équivalent de dose efficace peut être contestée dans la mesure où cette grandeur ne tient compte ni de la composition par âge d'une population active et du public pris au sens large ni des cancers curables et des dommages héréditaires dans les générations postérieures à la seconde. Diverses corrections ont été proposées pour tenir compte de ces ommissions mais, aux fins de la radioprotection et compte tenu de toutes les autres incertitudes, l'usage étendu de l'équivalent de dose efficace a été généralement accepté.

39. Recherchant les moyens de présenter les doses de rayonnement imputables à diverses sources et pratiques, le Comité s'est heurté aux mêmes problèmes que la CIPR. Dans le cas, notamment, des radioexpositions à des fins médicales et des expositions aux produits de filiation du radon dans le poumon, des doses très variables sont délivrées selon les organes; aussi la notion d'une dose pondérée à l'organisme entier a-t-elle semblé séduisante. Le Comité est très conscient du fait que l'équivalent de dose efficace n'avait pas été conçu pour les fins qui l'occupaient, mais il n'a pas été en mesure de trouver un autre moyen d'exprimer les radioexpositions par un chiffre unique.

40. L'équivalent de dose efficace additionne le risque de cancer et le risque de dommage héréditaire. Les coefficients de risque pour le cancer et pour le dommage héréditaire, quand on les applique à l'équivalent de dose efficace, ne sont nettement identifiables que si tous les organes reçoivent une seule et même dose. Dans les autres cas, l'équivalent de dose efficace fournit une base permettant d'évaluer le risque total mais non d'apprécier les proportions respectives du risque de cancer et du risque génétique (voir chap. III, sect. C).

41. L'équivalent de dose efficace a été utilisé dans le rapport de 1982, et des comparaisons ont été établies sur la base de l'engagement de dose efficace collective. Malheureusement, dans le souc de simplifier la présentation des doses et des comparaisons de doses, le Comité a eu recours à des termes de plus en plus compliqués. Il n'est cependant guère facile d'échapper à ce dilemme.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

C. Evaluation des doses

1. Sources naturelles de rayonnements

42. Lors de l'élaboration de son premier rapport (1958), le Comité avait conclu que les rayons cosmiques, le rayonnement gamma terrestre et le postassium-40 se trouvant au sein même de l'organisme constituaient les trois principales sources naturelles contribuant aux doses de rayonnement. Quand leur contribution commune a été évaluée dans les rapports publiés de 1958 à 1977, celle-ci a varié de 93 à 98 % de la dose totale absorbée d'origine naturelle, laquelle était estimée à environ 100 mrads par an. Cette contribution totale se décomposait approximativement comme suit : 30 mrads pour les rayons cosmiques, 30 à 50 mrads pour le rayonnement gamma terrestre et 20 mrads pour le potassium-40 présent dans l'organisme.

43. Dans tous les rapports publiés jusqu'à celui de 1972 inclus, les doses ont été évaluées pour trois tissus : gonades, ostéocytes et moelle osseuse active. Les doses par tête à ces organes servaient, dans le corps de chaque rapport, à procéder à des comparaisons de doses. Les valeurs obtenues ne variaient guère d'un rapport à l'autre, à l'exception d'une surestimation de la dose due à la composition neutronique des rayons en 1962.

44. Dans le rapport de 1977, la dose au poumon due à l'inhalation de produits de filiation du radon à l'intérieur des bâtiments figurait dans les tableaux récapitulatifs mais ne paraissait guère frappante car elle était présentée comme dose absorbée. En revanche, en 1982, quand l'équivalent de dose efficace a été calculé pour la première fois, l'importance de cette contribution est devenue manifeste puisqu'elle se montait à près de la moitié du total exprimé en moyenne pour l'ensemble du monde. Ainsi, l'équivalent de dose efficace annuel imputable aux sources naturelles a été évalué à 2 mSv environ, soit près de deux fois plus que la valeur avancée dans les rapports précédents quand la dose au poumon n'avait pas été prise en compte.

2. Explosions nucléaires

45. La plupart des explosions nucléaires ont eu lieu avant 1963. Leur puissance totale en équivalents TNT a été estimée par le Comité dans son rapport de 1964, soit :

Période	Puissance (Mégatonnes)
1945-1951	0,8
1952-1954	60,0
1955-1956	18,0
1957-1958	85,0
1959-1960	0,0
1961-1962	337,0

Ces chiffres ont été légèrement modifiés par la suite, à la lumière de renseignements plus récents (voir par. 143 et tableau 5).

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

46. Les essais dans l'atmosphère postérieurs à 1962 étaient réduits par rapport à ceux des années précédentes et ont complètement cessé depuis 1980. Les nombreuses explosions souterraines effectuées au cours de ces dernières années ont eu peu de répercussions sur l'environnement. Ce rappel chronologique montre la situation à laquelle s'est trouvé confronté le Comité sur le plan de l'environnement quand ses divers rapports ont été établis.

47. Les explosions importantes dans l'atmosphère injectent la plus grande partie des matières radioactives dans la stratosphère où elles subsistent un certain temps, les estimations des délais moyens de rétention variant de moins d'un an à environ cinq ans en fonction de la latitude et de l'altitude. Des retombées peuvent donc se produire des années après l'explosion qui a injecté les matières radioactives dans l'atmosphère. Les explosions de moindre importance après lesquelles les matières radioactives n'atteignent que la troposphère entraînent des retombées dans un délai se comptant en jours en ou semaines.

48. Lors de l'élaboration de son rapport de 1958, le Comité ne disposait pas encore de données suffisantes sur les réserves mondiales de matières radioactives pour pouvoir établir les modèles d'évaluation qu'il a utilisés dans ses rapports ultérieurs. Cependant, il a pu déterminer la corrélation existant entre les taux de retombée et les dépôts mesurés d'après les niveaux de contamination radioactive observés dans la végétation et les aliments. Comme on l'explique à la section B du chapitre II, les grandeurs que l'on a évaluées en premier étaient la dose génétiquement significative et la dose moyenne à la moelle osseuse par habitant, car le Comité a été à même, à leur sujet, de procéder à des estimations du risque.

49. Dans ses quatre premiers rapports (publiés de 1958 à 1966), le Comité a fourni une description détaillée des processus météorologiques qui déterminent la déplétion de la réserve stratosphérique de débris radioactifs. Il a estimé que la principale source de radioexposition de l'homme était constituée par les matières radioactives de période longue qui occasionneraient des expositions sur de nombreuses années. Les radionucléides les plus influents étaient le strontium-90 (période de 28 ans), le césium-137 (30 ans) et le carbone-14 (5 700 ans). En outre, certains radionucléides émetteurs de particules gamma contenus dans les retombées troposphériques, comme le zirconium-95 et le ruthénium-106, pouvaient représenter une contribution importante par exposition due aux dépôts de débris au sol.

50. Comme le Comité s'est attaché tout particulièrement à la dose délivrée à la moelle osseuse active et aux ostéocytes, le strontium-90 a été le premier radionucléide pour lequel ont été opérés des calculs très soigneux. Mais, en fin de compte, le césium-137 s'est avéré être responsable de doses plus fortes car l'homme est doublement exposé à son rayonnement gamma externe émanant de dépôts au sol et à une irradiation interne due à son ingestion avec l'alimentation. Les irradiations dues au césium-137 ont pu être vérifiées par des mesures directes, mais il a été plus difficile de le faire pour le strontium-90.

51. A l'occasion de son rapport de 1962, le Comité a mis en application la notion d'engagement de dose, qui lui a permis d'évaluer l'impact des essais effectués chaque année ou de tous les essais effectués jusqu'à l'établissement de chaque rapport. Cependant, lors de ces évaluations, la contribution du carbone-14 s'est avérée être élevée en raison de la période longue de ce nucléide. Des modèles servant à l'estimation de l'engagement de dose imputable au carbone-14 ont été décrits dans les rapports de 1962 et 1964.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

52. En 1964, l'attention s'est portée sur les fortes doses individuelles dues à des concentrations accrues de césium-137 dans certaines chaînes alimentaires, la chaîne lichen-renne notamment. Cette question a été à nouveau abordée dans le rapport de 1966, où il a été spécifié que les niveaux de césium-137 dans la viande de renne avaient atteint dans certains cas 100 nCi/kg (3 700 Bq/kg) et dans le poisson d'eau douce 10 nCi/kg.

53. Dans le rapport de 1969, les procédures mathématiques de tous les calculs ont été revues et on a introduit les notions de chaînes de transfert et de coefficients de transfert. Lors de l'élaboration du rapport de 1972, le taux de retombée avait sensiblement baissé par suite de l'arrêt des essais importants en 1962. On a donc pu procéder à de meilleures estimations de certains coefficients de transfert et il en est résulté une légère baisse des doses estimées.

54. En 1977, pour la première fois, on a évalué l'engagement de dose collective à la plupart des tissus mous de l'organisme imputable aux explosions nucléaires réalisées avant 1976 et on a obtenu des valeurs de 400 à 800 millions d'homme-rads sans contribution complète du carbone-14 et d'environ le double avec la contribution complète du carbone-14. A titre comparatif, dans le même rapport, on a estimé que la dose collective annuelle à la population mondiale imputable aux sources naturelles de rayonnements s'établissait à environ 300 millions d'homme-rads.

55. Dans le rapport de 1982, ce sont essentiellement les mêmes données de base qui ont été examinées. Les modèles d'évaluation des doses y ont été décrits dans une annexe spéciale contenant également une liste de coefficients de conversion, de symboles et d'unités. Cette fois, l'équivalent de dose efficace a été calculé. Selon l'évaluation de 1982, les contributions des principaux radionucléides à la dose collective se décomposaient ainsi :

Radionucléide	Engagement d'équivalent de dose efficace collective (10^6 homme-Sv)	
	Externe	Interne
Strontium-90	-	0,5
Zirconium-95	0,6	-
Ruthénium-106	0,2	0,1
Césium-137	1,5	0,7
Tous les autres sauf le carbone-14	0,2	0,7
Total partiel	2,5	2,0
Total	4,5	

56. L'un des principaux problèmes rencontrés lors de l'estimation des doses collectives futures tient à la nécessité de formuler des hypothèses quant à l'effectif de la population. En établissant ce chiffre dans le rapport de 1982, le Comité a postulé une population mondiale de 4 x 10^9 habitants pour calculer les doses collectives dues aux radionucléides de période de 10 à 30 ans. On a estimé à environ 1 mSv l'engagement de dose dû à ces radionucléides et aux autres de période

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

plus courte. Pour calculer la dose collective pour le carbone-14, le Comité a postulé une population mondiale de 4 x 10^9 lors de l'évaluation de 1977, mais de 10 x 10^9 lors de celle de 1982. De ce fait, l'estimation de l'engagement d'équivalent de dose efficace collective pour le carbone-14 s'est élevée à 26 millions d'hommes-Sv.

3. Production d'énergie d'origine nucléaire

57. En 1970, la puissance installée de l'ensemble des centrales nucléaires dans le monde était d'environ 20 GW. Au cours des 10 années suivantes, la puissance installée nucléaire s'est accrue de plus de 10 GW par an, pour atteindre 144 GW en 1981. Cette progression rapide de l'énergie d'origine nucléaire sur une vaste échelle justifiait des évaluations auxquelles le Comité a procédé dans son rapport de 1972. Se trouvant confronté à une situation similaire à celle qu'il connaissait dans le domaine des explosions nucléaires, le Comité a compris que l'évaluation des doses futures dépendrait des hypothèses retenues sur la poursuite et l'extension de la production d'électricité à partir de l'énergie nucléaire. Il est intéressant de signaler que le Comité a retenu à l'époque un rythme de développement dépassant d'un ordre de grandeur celui auquel on a en fait assisté.

58. En plus de l'évaluation des engagements de dose et des engagements de dose collective par année de pratique au rythme de production du moment, le Comité a donc aussi estimé ces grandeurs par unité d'électricité produite, soit par MW-an. Il a considéré que les principales contributions à l'engagement de dose collective provenaient de la contamination mondiale par le tritium et le krypton-85 libérés au cours du retraitement du combustible irradié ainsi que d'expositions locales à proximité des centrales nucléaires. Le total était évalué à environ 0,4 homme-rad/ MW-an. Cette valeur n'a cependant pas été inscrite sur les tableaux récapitulatifs ou dans le corps du rapport. A la place, le Comité a donné une estimation de la dose annuelle par habitant qui serait délivrée à la population mondiale si la production d'énergie d'origine nucléaire se maintenait au niveau prévu pour l'an 2000 (soit une puissance installée de 4 300 GWe). Selon les estimations, cette dose annuelle représentait environ 0,2 % de celle imputable aux sources naturelles de rayonnements.

59. Dans le rapport de 1977, on a adopté une démarche plus systématique pour évaluer les engagements de dose collective, exprimés par unité d'électricité produite, pour chaque étape du cycle du combustible nucléaire (extraction et traitement du minerai, fabrication du combustible, exploitation du réacteur et retraitement du combustible), y compris les expositions professionnelles. Les estimations de 1977 étaient sensiblement plus élevées que celles de 1972 car on disposait d'une masse plus importante de données qui se prêtaient à un traitement plus élaboré. On a estimé alors que la contribution de l'exposition professionnelle avoisinait les 4 hommes-rad/MW-an et que celle de l'exposition du public se situait entre 1,5 et 3,8 hommes-rad/MW-an. La plus forte contribution s'est avérée à nouveau provenir de la contamination due au retraitement dans le monde entier. Selon le Comité, il s'agissait là de valeurs peut-être quelque peu pessimistes car les enseignements tirés précédemment du retraitement et de la recherche-développement - deux composantes dont on évaluait la contribution à 4-6 hommes-rad/MW-an - pouvaient ne pas être significatifs pour les expériences futures. Les radioexpositions au radon provenant des résidus du traitement du minerai d'uranium posaient un problème particulier. Cette source devait entraîner des doses au poumon qui ne seraient pas élevées pour chaque individu, mais la longue période pendant laquelle le radon pourrait émaner des résidus (déterminée par la période radioactive du thorium-230) était susceptible d'augmenter notablement l'engagement de dose collective.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

60. Dans le rapport de 1982, le problème posé par le radon fut encore plus nettement reconnu à l'occasion du calcul de l'équivalent de dose efficace. Les diverses étapes du cycle du combustible qui n'entraînent aucune distribution mondiale occasionnaient à elles toutes 5,7 hommes-Sv/GW-an (0,57 homme-rem/MW-an) et, en plus, 2 hommes-Sv/GW-an étaient imputables à la distribution mondiale par le tritium et le krypton-85, d'après les estimations du rapport. La contribution de l'exposition professionnelle était évaluée à un peu moins de 30 hommes-Sv/GW-an. On obtenait donc une estimation totale d'environ 35 hommes-Sv/GW-an (3,5 hommes-rem/ GW-an), soit un chiffre légèrement en retrait par rapport à celui de 1977.

61. Mais, en outre, le Comité prévoyait une contribution du carbone-14 et de l'iode-129 - deux radionucléides de période très longue (5 700 ans et $1,6 \times 10^7$ ans respectivement) - ainsi que de l'émanation du radon issu de la désintégration du thorium-230 (8×10^4 ans) et des actinides de période longue s'échappant des dépôts de déchets de haute activité. A l'exception du carbone-14, on ne prévoyait pas que ces radionucléides entraîneraient une dose collective cumulative importante sur une période de 1 000 ans (mais le carbone-14 devait produire 10 hommes-Sv/GW-an pendant les 100 premières années). Toutefois, au bout de 1 million d'années, en postulant une population mondiale de 10^{10} millions d'habitante, on estimait à environ 3 400 hommes-Sv/GW-an la dose collective imputable aux radionucléides de période longue. Cette dose se répartissait comme suit :

Radionucléide	Hommes-Sv/GW-an
Radon des résidus de traitement du minerai	2 800
Uranium des résidus de traitement du minerai	460
Carbone-14	110
Déchets de haute activité	30
Iode-129	28

Les doses correspondantes délivrées à chaque individu sur une durée de vie seraient tout à fait négligeables par rapport aux doses provenant de rayonnements naturels, les chiffres élevés étant simplement dus à la longueur des périodes radioactives. La question de savoir dans quelle mesure des expositions sur des durées aussi longues peuvent intervenir dans la prise de décisions ne se pose pas sur un plan scientifique.

62. En recourant à la notion d'engagement de dose incomplet (ou tronqué) et postulant pour l'avenir une production annuelle d'électricité d'origine nucléaire de 10 000 GW-an, le Comité estima enfin l'équivalent de dose efficace annuelle par habitant à environ 25 microsieverts par an, soit environ 1 % de la dose imputable au rayonnement naturel.

4. Radioexpositions à des fins médicales

63. Dès 1957, et travaillant à son rapport de 1958, le Comité formula une conclusion d'un grand intérêt : "Il importe au plus haut point ... que les irradiations médicales de toute forme soient restreintes à celles qui sont valables et importantes pour les investigations et le traitement, de sorte que l'irradiation de la population puisse être réduite au minimum sans nuire en aucune façon à l'utilisation efficace des rayonnements à des fins médicales." Il sollicita aussi davantage de données sur les radioexpositions à des fins médicales, dont il reconnut qu'elles étaient responsables d'une importante partie de l'irradiation totale reçue par l'humanité.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

64. Dans son rapport de 1958, le Comité accorda la priorité à l'évaluation de la dose génétique significative. Il s'avéra que les plus fortes doses génétiquement significatives étaient dues aux examens radiodiagnostiques, lesquels consistaient à l'époque en radioscopies plutôt qu'en radiographies. Ces examens furent classés selon leur procédure en 23 types et l'on présenta des données sur les irradiations correspondantes dans quelques pays. Ces données permirent de comparer les doses selon les diverses procédures. En outre, il fut procédé à des estimations grossières de la dose moyenne à la moelle osseuse par habitant selon ces procédures. On constata que plus de 80 % de la dose génétiquement significative étaient imputables à six ou sept procédures seulement, lesquelles ne représentaient à elles toutes que 10 % environ de l'ensemble des examens. Les données indiquaient qu'il serait possible de réduire considérablement les doses en prêtant soigneusement attention aux modalités techniques. La dose génétiquement significative totale due aux examens radiologiques variait de 17 à 150 millirems par an selon les diverses estimations nationales.

65. Dans le rapport de 1966, le Comité poursuivit l'examen des données soumises par pays. Il disposait de données détaillées pour 12 pays et obtint des résultats voisins de ceux qui figuraient dans le rapport de 1958. Les valeurs des doses génétiquement significatives variaient cette fois de 7 à 58 millirems par an. Le rapport examina les moyens de diminuer les doses délivrées aux patients et énuméra les mesures permettant de les protéger le mieux, par exemple en réduisant le plus possible le champ de rayonnement et en abrégeant la durée des examens radioscopiques. Il s'agissait donc là d'une recommandation formulée à des fins de radioprotection avant que la CIPR n'eût encore émis de recommandations spéciales en matière de protection du patient.

66. Les radioexpositions à des fins médicales ont été réexaminées dans le rapport de 1972. Dans ce rapport, le Comité mit à nouveau l'accent sur la dose génétiquement significative dont les évaluations variaient cette fois de 5 à 75 mrads par an, bien qu'on fît état d'une augmentation de 2 à 6 % par an du nombre des examens radiologiques. Selon le Comité, les données disponibles pour les pays industrialisés constituaient une base suffisante pour qu'on s'employât à éliminer les expositions qui n'étaient pas indispensables. Cependant, il remarqua qu'une proportion très importante de la population mondiale n'avait pas accès à des installations radiologiques modernes et au bénéfice qui en eût résulté pour sa santé.

67. Dans le rapport de 1977, le Comité examina les problèmes posés par la comparaison de doses imputables à diverses sources, comme le rayonnement naturel, les explosions nucléaires, la production d'énergie d'origine nucléaire et les radioexpositions à des fins médicales. Dans le cas de celles-ci, les doses aux divers organes dues au radiodiagnostic peuvent varier de quelques millirads à quelques dizaines de rads et elles sont généralement délivrées à des débits de dose élevés. La distribution des doses est inégale, tant dans l'organisme que dans la population. L'accent mis jusqu'alors sur la dose génétiquement significative peut également occulter des irradiations appréciables d'autres organes. C'est pourquoi le Comité étendit cette fois ses évaluations en y englobant d'autres tissus que les gonades et la moelle osseuse active.

68. Tout en s'employant à trouver des bases autorisant des comparaisons de doses, le Comité rechercha les moyens de regrouper les doses aux divers organes en une seule dose pondérée à l'organisme entier qui servirait à évaluer le risque de cancer. Dans son rapport de 1982, il se rangea à un compromis : il décida d'évaluer l'équivalent de dose efficace, méthode qui, en dépit de ses insuffisances, répondait le mieux aux objectifs recherchés.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

69. L'évaluation de 1982 confirma que les radioexpositions à des fins médicales représentaient la plus importante contribution d'origine artificielle aux doses reçues par la population et que, dans certains pays industrialisés, cette contribution avoisinait la dose d'origine naturelle. Toutefois, le Comité rappela que les radioexpositions à des fins médicales se distinguaient des autres radioexpositions artificielles dans la mesure où cette pratique profitait directement à ceux qui étaient exposés. Le nombre annuel d'examens radiologiques se situait désormais entre 300 et 900 par millier d'habitants dans les pays industrialisés, compte non tenu des dépistages systématiques et des examens dentaires. Les examens radiologiques contribuaient pour la plus grosse part à l'équivalent de dose efficace collective dû aux actes médicaux, la radiothérapie et la médecine nucléaire ne représentant qu'une contribution mineure.

70. Le Comité a constaté, avec déception, qu'on ne disposait que d'un nombre fort restreint de données pour près des deux tiers de la population mondiale vivant dans des pays où la fréquence des examens radiologiques était inférieure d'un ordre de grandeur à celle des pays industrialisés. Pour ces derniers, le Comité a estimé que l'équivalent de dose efficace collectif total dû aux actes médicaux était de l'ordre de 1 000 hommes-sievert par million d'habitants, soit environ 50 % de l'exposition d'origine naturelle.

5. Radioexpositions professionnelles

71. Le Comité a examiné les radioexpositions professionnelles dans ses rapports de 1958, 1972, 1977 et 1982 et a signalé à plusieurs reprises que les données soumises étaient difficiles à analyser pour un certain nombre de raisons. Les doses communiquées étaient celles qui étaient lues sur les dosimètres individuels et la grandeur effectivement mesurée dépendait à la fois du type et de l'étalonnage du dosimètre. Les doses relevées étaient fonction de la position du dosimètre sur le corps et l'on devait supposer qu'elles étaient proches d'une dose uniforme à l'organisme entier. Le nombre des personnes soumises à une radioexposition professionnelle n'était pas le même que celui des personnes bénéficiant de la surveillance radiologique, ces différences dépendant des prescriptions nationales en matière de surveillance radiologique. La plupart des programmes de surveillance radiologique ne visaient pas à fournir des données pour des fins s'apparentant à celles du Comité mais à s'assurer que les limites de dose autorisées n'étaient pas dépassées. On avait généralement recours à des niveaux dits d'investigation au-dessous desquels les doses étaient ignorées ou consignées comme nulles, si bien qu'on disposait de peu de données concernant la région des doses faibles.

72. Cette question fut brièvement abordée dans le rapport de 1958. Pour les pays ayant soumis des données, on estima que le nombre de personnes employées dans le secteur médical se situait entre 0,2 et 0,7 par millier d'habitants. L'examen des radioexpositions professionnelles fut également succinct dans le rapport de 1962. On y constata que le personnel des professions dentaires avait des effectifs environ deux fois plus élevés que le personnel médical, alors que le nombre de personnes soumises à une radioexposition professionnelle dans l'industrie ou la recherche était nettement plus faible. La contribution des radioexpositions professionnelles à la dose génétiquement significative fut estimée à 0,2-0,5 mrem.

73. A l'époque de la publication du rapport de 1972, les données publiées sur les radioexpositions professionnelles étaient encore rares. Le nombre de personnes employées dans le secteur médical se situait entre 0,3 et 0,5 par millier d'habitants pour les pays ayant soumis des données, et le nombre total de personnes

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

exposées en raison de leur profession était de 1 à 2 par millier d'habitants. On constata que la dose moyenne enregistrée pour la plupart des types de travail sous rayonnement variait de 0,2 à 0,6 rad par an, mais des doses moyennes atteignant 2,7 rads étaient signalées pour une certaine catégorie de travailleurs de la radiographie industrielle. La dose annuelle reçue par les équipages des avions supersoniques était évaluée à 1 rem environ. Les radioexpositions professionnelles dans les centrales nucléaires étaient exprimées par unité d'électricité produite et elles étaient estimées à 2,3 homme-rads/MW-an (dont 1,6 pour le retraitement du combustible et 0,7 pour l'exploitation du réacteur).

74. Dans le rapport de 1977, une annexe fut consacrée aux irradiations professionnelles. Pour la première fois, le Comité procéda à un examen systématique des buts et des méthodes de l'évaluation. Il constata que la distribution des doses à l'intérieur des groupes professionnels exposés était généralement log-normale et, sur cette base, il définit une distribution de référence. Pour éviter d'avoir à déterminer le nombre effectif de travailleurs et, partant, les doses moyennes, le Comité mit l'accent sur les doses collectives dont les valeurs évaluées devaient être dans une large mesure indépendantes des prescriptions administratives sur le degré de surveillance radiologique. Le Comité calcula aussi la fraction de la dose collective correspondant aux doses individuelles supérieures à 1,5 rad. L'analyse des données soumises s'effectua sur cette base. Pour la plupart des types d'emploi, la dose moyenne se situait dans une fourchette de 0,1-1,0 rad par an et la fraction "doses élevées" représentait de 3 à 60 % de la dose collective. Une description mathématique détaillée de la distribution log-normale et de la distribution de référence était fournie. Les doses collectives correspondant à chaque étape du cycle du combustible nucléaire étaient calculées, ce qui ajoutait environ une contribution de 4 homme-rad/MW-an (cf. chap. II, sect. C.3). La dose collective absorbée au poumon chez les ouvriers des mines d'uranium était estimée à 0,1 homme-rad/MW-an et l'on citait des exemples de niveaux élevés de radon dans des mines non uranifères.

75. Dans son rapport de 1982, le Comité reprit l'analyse sur une base élargie de données. Il nota avec satisfaction que plusieurs organismes avaient adopté les méthodes qu'il avait préconisées en 1977 et que la présentation des données s'en ressentait, facilitant ainsi l'analyse. Cependant, le Comité s'aperçoit que sa suggestion d'une distribution de référence avait parfois prêté à malentendu et il borna donc son analyse à la dose moyenne, à la dose collective et à la fraction de la dose collective dépassant 15 mSv (soit la valeur de 1,5 rad du rapport précédent).

76. Pour les pays dotés d'un haut niveau de soins de santé, on constata que le personnel médical recevait un équivalent de dose collective d'environ 1 homme-Sv par million d'habitants. Le nombre de travailleurs du secteur de l'industrie nucléaire s'étant nettement accru depuis 1977, le Comité procéda à une évaluation plus soigneuse des radioexpositions professionnelles correspondant à chaque étape du cycle du combustible. Il en résulta que l'équivalent de dose efficace collective pouvait avoisiner 30 homme-Sv/GW-an (3 homme-rems/MW-an). Toutefois, la moitié de cette dose était due au retraitement du combustible et à la recherche nucléaire et il était douteux qu'on dût prévoir des contributions aussi élevées dans le futur. Pour l'exploitation des réacteurs, les radioexpositions les plus fortes étaient délivrées aux techniciens d'entretien et au personnel de la radioprotection au cours d'opérations spéciales d'entretien.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

6. Radioexpositions diverses

77. En dehors des principales sources de rayonnements examinées jusqu'ici, le Comité, dès son rapport de 1958, en identifia quelques autres qu'il regroupa par la suite sous la rubrique "sources diverses". Celles qui étaient mentionnées dans le rapport de 1958 comprenaient les montres à cadran luminescent, les postes de télévision susceptibles de donner naissance à des rayons X mous et les appareils d'ajustage par radioscopie X des chaussures. Aucune de ces sources n'était censée entraîner une dose génétiquement significative supérieure à 1 mrem par an, mais les appareils de radioajustage des chaussures pouvaient occasionner localement des doses élevées. Le rapport de 1962 mentionnait, tout en la jugeant insignifiante, une exposition accrue des passagers des transports aériens aux rayons cosmiques. Selon les prévisions, la dose génétiquement significative imputable à l'ensemble des sources diverses ne devait pas dépasser 2 millirems par an, les montres radioactives fournissant la principale contribution.

78. Dans le rapport de 1972, une annexe entière fut consacrée aux sources diverses. Des incidents, accidents de transport et pertes de matières radioactives étaient mentionnés comme sources supplémentaires de radioexpositions du public. Un certain nombre de biens de consommation étaient également identifiés : articles d'horlogerie luminescents ou autres instruments similaires, émaux céramiques renfermant de l'uranium, électrodes à base de thorium de baguettes à soudure. D'autres sources mentionnées comprenaient les substances radioactives présentes dans l'organisme de patients après un séjour hospitalier, les stimulateurs cardiaques à piles nucléaires, les appareils de démonstration utilisés dans l'enseignement. Les postes de télévision firent l'objet d'un nouvel examen, notamment les téléviseurs couleurs dont le tube cathodique fonctionne en voltage supérieur. Enfin, le Comité reconnut que des niveaux accrus de rayonnement naturel pouvaient poser des problèmes, dans le cas, par exemple, des matériaux radioactifs employés dans le bâtiment. Dans les rapports ultérieurs, cette question allait acquérir de l'ampleur et cesser d'être traitées sous la rubrique "sources diverses".

79. Dans le rapport de 1977, les sources diverses étaient examinées dans une annexe consacrée aux niveaux technologiquement accrus de rayonnement. Parmi les produits de consommation ajoutés à la liste figuraient les détecteurs de fumée à chambre d'ionisation. Le rapport s'attachait cependant surtout à l'accroissement de la radioexposition due au rayonnement naturel. Une exposition accrue aux rayons cosmiques dans les transports aériens, y compris les vols supersoniques et les missions spatiales, était examinée en détail. Il aborda également la radioexposition du public due aux radionucléides naturels émis par les centrales électriques au charbon. Un troisième sujet fut les radioexpositions dues à l'utilisation industrielle des produits phosphatés contenant de l'uranium-238 et du radium; dans ce cas, l'exposition se produit par la voie des engrais phosphatés et du phosphogypse employé dans les matériaux de construction. La radioexposition normale imputable aux matériaux de construction, qu'elle soit directe par les rayons gamma ou indirecte par les produits de la filiation du radon, n'était pas traitée sous cette rubrique mais sous celle des sources naturelles.

80. Dans le rapport de 1982, les sources diverses furent à nouveau examinées conjointement aux radioexpositions, modifiées par la technique, au rayonnement naturel. Le rapport reprit pour l'essentiel l'examen des produits de consommation déjà mentionnés dans les rapports précédents, tout en notant que les montres-bracelets au radium avaient été presque totalement remplacées par des montres au tritium, ce qui éliminait la radioexposition externe et limitait à moins d'un microsievert la dose absorbée due aux fuites de tritium. L'équivalent de dose efficace moyen délivré aux passagers franchissant les dispositifs de détection

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

radioscopique des aéroports fut estimé à une valeur encore plus faible, environ 7 nanosieverts par voyage. Les radioexpositions dues aux centrales électriques au charbon furent réévaluées et l'on estima à une moyenne de 2 homme-Sv/GW-an l'équivalent de dose efficace collectif correspondant [soit 50 % de la dose collective locale et régionale émanant de la production d'une même quantité d'énergie dans les centrales nucléaires (voir tableau 6)]. Selon le rapport, la production de phosphates naturels en 1977 avait entraîné un engagement d'équivalent de dose efficace collective d'environ 300 000 homme-Sv, dû en majeure partie à l'emploi de gypse, dans les habitations. La contribution totale imputable à d'autres usages n'était estimée qu'à 6 000 homme-Sv.

7. Accidents et incidents

81. Le Comité a examiné les accidents radiologiques dans ses rapports de 1962, 1972, 1977 et 1982. En 1962, il procéda à l'examen des huit accidents importants dont il avait eu connaissance à l'époque. Ces accidents avaient occasionné au moins quatre décès. Dans sept cas sur huit, il s'était agi d'accidents de criticité : 5 aux Etats-Unis, 1 en Union soviétique et 1 en Yougoslavie. Le huitième était dû à des rayons X pulsés provenant d'un tube électronique non protégé dans une station radar. L'évolution de ces cas et les symptômes cliniques présentés par les personnes exposées firent l'objet d'une étude assez détaillée.

82. Le rapport de 1972 n'aborda que brièvement la question des accidents. Le Comité nota qu'environ 100 accidents en rapport avec le transport de matières radioactives avaient été signalés dans le monde entre 1954 et 1968. Il y avait eu 14 accidents d'avions transportant des armes nucléaires ou des éléments de ces armes. Deux sous-marins nucléaires avaient été portés disparus et un générateur isotopique au plutonium-238 avait pris feu dans les couches supérieures de l'atmosphère. On avait également signalé un certain nombre d'incidents comportant la perte ou le vol de matières radioactives. L'analyse de 115 incidents portant sur du radium, survenus de 1966 à 1969, montra qu'il s'était agi de pertes dans 55 % des cas. Dans une autre étude consacrée à 299 cas de perte ou vol de radium, on avait constaté que 66 % des sources avaient été récupérées. En outre, le même rapport évoqua brièvement les accidents professionnels, indiquant qu'ils étaient particulièrement fréquents au cours des travaux d'analyse aux rayons X ainsi que dans le secteur de la radiographie industrielle.

83. C'est dans son rapport de 1977 que le Comité examina pour la première fois les accidents survenus dans les centrales nucléaires. En étudiant les engagements de dose collective imputables aux diverses étapes du cycle du combustible, le Comité aborda le problème ardu des engagements de dose dus aux accidents non encore survenus. Tout programme de production d'énergie d'origine nucléaire implique aussi une certaine probabilité d'accidents. C'est en ce sens que le Comité déclara qu'on avait aussi affaire à un engagement de dose dû aux accidents.

84. Dans le rapport de 1982, le Comité releva que, jusqu'alors, seuls deux accidents connus avaient entraîné une irradiation mesurable du public : au réacteur militaire de Windscale en 1957 et à la centrale nucléaire de Three Mile Island en 1979. Selon les estimations, la dose collective à l'organisme entier imputable à ce dernier accident se situait entre 16 et 35 homme-Sv dans un rayon de 80 kilomètres; elle était surtout due au xénon-133. Au-delà des 80 kilomètres, la contribution était jugée d'une importance à peu près égale. L'équivalent de dose efficace collective due à l'accident de Windscale avait été estimé à environ 1 300 homme-Sv, dont presque la moitié était due aux isotopes de l'iode et à l'irradiation de la thyroïde. Le Comité décida que les méthodes probabilistes,

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

consistant à prévoir par extrapolation au futur le risque que font courir les programmes de réacteurs, ne devraient pas servir de base à l'estimation des composantes à venir de l'engagement de dose collective.

85. Dans une autre partie du rapport de 1982, le Comité examina les renseignements ayant trait aux accidents professionnels. Il énuméra sous forme de tableaux les accidents graves pour lesquels il avait reçu des données ou qui avaient fait l'objet de communications dans des publications scientifiques. Le Comité nota que les accidents graves s'étaient produits au début de l'essor de la technologie nucléaire et qu'aucun accident important survenu pendant l'exploitation de réacteurs n'avait été signalé depuis le milieu des années 60. Depuis 1960, les accidents radiologiques survenus dans d'autres industries avaient entraîné un seul décès, en 1975, dans une installation au cobalt-60. Comme on l'avait déjà relevé dans des rapports précédents, la radiographie industrielle semblait présenter un potentiel particulier d'accidents. Des lésions graves avaient été causées à des ouvriers qui avaient ramassé des sources employées en radiographie et qui avaient été perdues, sans se rendre compte du danger qu'ils couraient.

D. Evaluation du risque

1. Dommage héréditaire

86. Les méthodes appliquées jusqu'à présent pour évaluer quantitativement le risque génétique peuvent être en gros ramenées à deux types : la méthode de la dose doublante (ou méthode du risque relatif de mutation) et la méthode directe. La méthode de la dose doublante vise à exprimer le risque par rapport à la prévalence naturelle des maladies génétiques dans l'ensemble de la population; la méthode directe permet d'exprimer le risque absolu en termes d'accroissement prévu de la prévalence des maladies génétiques. En raison du manque de données directes sur les dommages génétiques radioinduits et conduisant à des affections chez l'être humain, la fréquence d'une induction des types pertinents de dommage génétique (mutation et aberrations chromosomiques) repose sur des résultats expérimentaux obtenus chez des animaux. Cette fréquence est convertie, au moyen d'un certain nombre d'hypothèses et de facteurs de réduction, pour donner le nombre attendu de cas supplémentaires de troubles génétiques chez l'homme.

87. Pour appliquer la méthode de la dose doublante, il faut disposer : a) d'une estimation de la dose doublante, c'est-à-dire de la quantité de rayonnement qui produira le même nombre de mutations que celles qui surviennent spontanément dans une génération donnée; b) de renseignements sur la prévalence naturelle des maladies génétiques dans la population et la mesure dans laquelle ces maladies se maintiennent par mutation; c) d'une estimation de la dose reçue par la population. Les estimations de la dose doublante, qui ont été utilisées au cours des années, reposent sur les résultats d'expérience sur les souris; les chiffres relatifs à la prévalence de maladies génétiques survenant naturellement ont été fournis par plusieurs études épidémiologiques. Dans la méthode de la dose doublante, le risque est estimé comme étant le produit des éléments suivants : prévalence des maladies génétiques d'origine naturelle, facteur de mutation, inverse de la dose doublante et dose reçue par la population.

88. Au cours des 30 dernières années, l'importance relative accordée à chacune de ces méthodes a varié et on a apporté aussi un certain nombe d'améliorations, qui sont examinées en détail à l'annexe E. Les principes qui ont guidé le Comité, ainsi que d'autres organismes scientifiques, quand ils ont commencé à évaluer le risque héréditaire radioinduit dans les années 50 sont ceux qui se sont dégagés des

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

vastes travaux menés sur la drosophile, des résultats préliminaires d'expériences sur les mammifères, particulièrement la souris, et de quelques données éparses en ce qui concerne l'être humain. Il s'agissait notamment des deux principes suivants : a) les mutations, induites ou spontanées, étaient généralement nuisibles; et b) les mutations radioinduites augmentaient dans une relation linéaire sans seuil avec la dose.

89. A la lumière de nouveaux résultats d'études sur les souris mâles dont il ressortait qu'une dose continue de rayonnement gamma était environ trois fois moins efficace que la même dose délivrée à un débit élevé (et encore moins efficace chez les femelles), le rapport de 1962 suggéra que la dose doublante de 30 röntgens précédemment utilisée était vraisemblablement de trois à quatre fois trop faible. Avec la confirmation et la multiplication des résultats et autres données mettant en évidence que le délai entre l'irradiation et la conception avait une incidence spectaculaire sur la fréquence des mutations chez la souris femelle (toutes les mutations observées l'étaient chez des souris conçues dans les sept premières semaines après l'irradiation), le Comité abandonna en 1966 la méthode de la dose doublante au profit d'autres, dont nous allons mentionner deux. Dans la première, le taux estimé d'induction de mutations visibles dominantes chez la souris (de l'ordre de 10^{-9} à 10^{-7} par locus et par rad) est multiplié par le nombre postulé de loci déterminant des troubles dominants chez l'homme (de 50 à 500), ce qui donne le risque total (de 5×10^{-8} à 5×10^{-5}). Dans l'autre, le taux estimé d'induction de mutations visibles récessives chez la souris (10^{-7} par locus et par rad) est multiplié par le nombre total estimé de loci de gènes chez l'homme (20 000), ce qui donne une estimation du risque total d'induction de ces mutations ponctuelles (2×10^{-3}). Le risque pour les descendants de la première génération est alors calculé et correspond à une fraction (2 à 5 %) du premier chiffre.

90. Dans son rapport de 1972, le Comité manifesta à nouveau de l'intérêt pour la méthode de la dose doublante en lui donnant cependant une place plus faible. Avec une exposition doublante de 100 rads, le nombre de cas supplémentaires de maladies héréditaires graves par million de naissances vivantes et par rad de rayonnement à faible TLE a été estimé à environ 300 dont environ 6 à 15 cas survenaient selon les estimations dans la première génération et les autres dans les générations ultérieures.

91. En 1977, de nouvelles données avaient été obtenues sur la prévalence naturelle des maladies génétiques et partiellement génétiques. De plus, les données datant des années 60 relatives à l'induction de mutations dominantes affectant essentiellement le squelette de la souris avaient été étendus au milieu des années 70, faisant apparaître la transmission. En 1982, des renseignements supplémentaires avaient été recueillis sur l'induction d'un autre type de mutations dominantes, celles qui sont à l'origine de la catastrophe chez la souris. Toutes ces données permirent au Comité d'estimer directement les risques génétiques. Il convient de noter qu'à partir de 1977, celui-ci a utilisé aussi bien les méthodes de la dose doublante que la méthode directe.

92. En 1977, le Comité estima qu'avec une dose doublante de 100 rads, dans une population exposée à une irradiation continue à faible TLE à raison de 1 rad par génération, on observerait en tout quelque 185 cas de troubles mendéliens, chromosomiques et autres par million de naissances vivantes à l'équilibre, dont environ le tiers dans la première génération. Selon ces estimations, l'accroissement dans la première génération était égal à un tiers environ de l'accroissement à l'équilibre.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

93. Ces estimations, ainsi que celles des rapports de 1982 et 1986, sont récapitulées au tableau 1; pour plus de commodité, elles sont exprimées en risques par sievert. Il ressort de ce tableau que : a) dans le cas des maladies dominantes héritées, les estimations n'ont guère changé; b) les estimations relatives aux maladies chromosomiques sont devenues plus faibles, car on a exclu de ces maladies celles qui sont dues aux anomalies numériques (par exemple le syndrome de Down) pour lesquelles il n'existe pas encore d'indication probante qu'elles seraient radioinduites; c) alors qu'en 1977 et 1982 le Comité a établi ces estimations du risque, dans le cas de maladies congénitales et autres maladies multifactorielles, en recourant à certaines hypothèses, il y a renoncé en 1986 en raison des incertitudes qui continuent de peser sur ces hypothèses.

94. Les estimations du risque faites par la méthode directe, de 1977 à 1986, sont présentées au tableau 2 et englobent les risques dus : a) à l'induction de modifications génétiques ayant des effets dominants dans la descendance de la première génération (c'est-à-dire mutations dominantes aussi bien que mutations récessives, délétions et remaniements réciproques symétriques à effets dominants); et b) aux résultats asymétriques des remaniements réciproques symétriques qui peuvent se traduire par une descendance présentant des malformations congénitales.

95. La première de ces estimations (estimation a, par. 94), correspond aux mutations dominantes affectant le squelette ou provoquant la cataracte chez la souris et la deuxième (estimation b, par. 94) aux données cytogénétiques chez les primates. Ces estimations ne tiennent pas compte des modifications génétiques induites dont la gravité peut aller jusqu'à causer la mort avant qu'elles puissent être décelées. Il ressort du tableau que les estimations du risque n'ont guère changé entre 1977 et 1986. De plus, en comparant ces estimations à celles qui ont été obtenues au moyen de la méthode de la dose doublante (tableau 1) pour la première génération, on s'aperçoit que les résultats sont du même ordre bien que l'on ait employé des hypothèses et des facteurs de réduction différents.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

Tableau 1

Estimations du risque de maladie génétique grave, par million de naissances vivantes, dans une population exposée à un équivalent de dose génétiquement significative de 1 Sv par génération, avec faible débit de dose et irradiation à faible dose selon la méthode de la dose doublante (sur la base des rapports du Comité de 1977, 1982 et 1986) (l'équivalent de dose doublante utilisé dans ces calculs est de 1 Sv)

Classification des maladies	Incidence observée par million de naissances vivantes	Effet de 1 Sv par génération	
		Première génération	Equilibre
1977			
Maladies dominantes autosomiques et liées à l'X	10 000	2 000	10 000
Maladies récessives autosomiques	1 100	Relativement faible	Accroissement très lent
Troubles chromosomiques (dus à des anomalies numériques et structurelles)	4 000	3 800	4 000
Anomalies congénitales et autres maladies multifactorielles	43 000) 47 000)	450	4 500
1982			
Maladies dominantes autosomiques et liées à l'X	10 000	1 500	10 000
Maladies récessives autosomiques	2 500	Relativement faible	Accroissement très lent
Troubles chromosomiques :			
Dus à des anomalies structurelles	400	240	400
Dus à des anomalies numériques	3 000	Probablement très faible	
Anomalies congénitales et autres maladies multifactorielles	43 000) 47 000)	450	4 500
1986			
Maladies dominantes autosomiques et liées à l'X	10 000	1 500	10 000
Maladies récessives autosomiques	2 500	5	1 500
Maladies chromosomiques :			
Dues à des anomalies structurelles	400	240	400
Dues à des anomalies numériques	3 400	Probablement très faible	
Anomalies congénitales et autres maladies multifactorielles	60 000) 600 000)	Non évalué pour les raisons indiquées au paragraphe 186	

Note : La manière dont ces chiffres ont été obtenus est indiquée à l'annexe E : voir également par. 93.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

Tableau 2

Estimations, selon la méthode directe, du risque (pour un équivalent de dose génétiquement significatif de 1 Sv) de maladies génétiques au cours de la première génération, par million de naissances vivantes, à la suite d'un faible débit de dose, d'une exposition à faible dose de la génération des parents (sur la base des rapports du Comité de 1977, 1982 et 1986)

Mutations auxquelles le risque est associé	Nombre escompté d'enfants génétiquement anormaux au cours de la première génération, par million de naissances vivantes après une irradiation des	
	Males	Femelles
1977		
Mutations induites ayant des effets dominants	2 000	Non indiqué
Résultats asymétriques des remaniements chromosomiques induits	200-1 000	Non indiqué
1982		
Mutations induites ayant des effets dominants	1 000-2 000	0-900
Résultats asymétriques des remaniements chromosomiques induits	30-1 000	0-300
1986		
Mutations induites ayant des effets dominants	1 000-2 000	0-900
Résultats asymétriques des remaniements chromosomiques induits	100-1 500	0-500

Note : La manière dont ces chiffres ont été obtenus est indiquée à l'annexe E; voir également par. 94 et 95.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

2. Cancer

96. Dans son rapport de 1958, le Comité soulignait déjà que toute tentative visant à évaluer les effets biologiques des sources de rayonnement auxquelles était exposée la population mondiale ne pouvait aboutir qu'à des estimations provisoires comportant d'importantes marges d'incertitude. En dépit de ces réserves, le rapport présentait des évaluations du nombre annuel possible de cas de leucémie et de cancer des os résultant du rayonnement naturel et des retombées. Les données sur l'incidence des leucémies imputables à la radioexposition provenaient, pour la plupart, des études menées sur les survivants des bombardements atomiques et les patients atteints de spondylite ankylosante.

97. A l'époque, le Comité estimait à 12 cas par million d'habitants et par rem la probabilité totale d'induction de la leucémie sur 15 ans. Il notait cependant qu'à Hiroshima la probabilité par dose unitaire diminuait très nettement en fonction d'une dose décroissante et que l'incidence de la leucémie dans cette ville ne semblait pas être en relation linéaire avec la dose. Le Comité procéda également à ce qu'il appela une estimation grossière du risque de leucémie encouru par les patients atteints de spondylite ankylosante qui avaient été traités par les rayons X. Sur une période de 15 ans, ce risque était estimé à environ 20 cas par million et par rem. Cependant, au cours d'une période de 35 ans qui représente la durée de vie restante moyenne de la population considérée et pourrait constituer la période de risque dans des conditions d'exposition prolongée à des débits de dose inférieurs, le risque était évalué à 52 cas par million et par rem.

98. En examinant l'hypothèse admise d'une linéarité sans seuil entre la dose et l'incidence du cancer, le Comité déclara dans le rapport de 1962 que des effets somatiques étaient moins susceptibles de se produire aux faibles débits de dose qu'aux débits élevés utilisés dans bon nombre d'expériences. Les seuls arguements qu'on pouvait invoquer en faveur d'une application aux faibles doses de la relation observée aux doses supérieures tenaient à la commodité de la procédure et à la cohérence des hypothèses concernant les mécanismes en jeu dans l'une et l'autre gammes de doses. Mais le Comité ne pouvait préciser si, ce faisant, il sous-évaluait ou surévaluait le risque. Pour ces raisons, il décida de ne pas estimer les risques absolus mais de présenter plutôt des estimations de risque comparé pour les gonades (effets génétiques), la moelle osseuse et les cellules endostéales, d'après les doses et engagements de dose à ces tissus imputables à des sources de rayonnement naturel, à des radioexpositions médicales, professionnelles et autres, ainsi qu'aux essais nucléaires.

99. Trois questions fondamentales étaient à envisager dans l'estimation du risque aux faibles doses : les types d'effet; les tissus critiques pour chacun de ces types; la fonction de la dose, du débit de dose et de la distribution de la dose à retenir comme paramètre pertinent pour chacun de ces effets. Pour les effets somatiques, on retenait comme tissus critiques la moelle osseuse active et le tissu conjonctif tapissant les travées ou surfaces endostéales.

100. Même si, s'agissant des effets génétiques, les données expérimentales justifiaient l'hypothèse d'une linéarité sans seuil aux doses et débits de doses faibles, on ne pouvait poser pareille hypothèse pour les effets somatiques tardifs car l'induction de tumeurs à des niveaux élevés de dose ne pouvait être décrite que par une fonction de la dose et d'autres facteurs d'irradiation qui étaient d'une grande complexité. Néanmoins, on prévoyait qu'aux faibles niveaux de dose, le mécanisme de production d'effets tardifs serait beaucoup plus simple et que tous les effets susceptibles de survenir résulteraient de changements spécifiques

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

induits dans des cellules à considérer isolément. Pour certains effets présentant une relation non linéaire aux niveaux de dose élevés, on jugeait probable que la pente de la courbe dose-réponse serait linéaire près de l'origine des coordonnées. Ainsi, l'étalement de la radioexposition et l'hétérogénéité de la distribution de la dose pouvaient être ignorés. Le Comité examina aussi l'importance qu'il y avait à prendre en compte la manière dont un effet se manifestait sur un certain délai.

101. Evoquant les problèmes rencontrés dans l'établissement des estimations du risque absolu, le Comité nota en 1964 que précédemment, sauf dans le cas de la leucémie, il s'était borné à estimer des risques comparatifs. Après avoir examiné les données disponibles, le Comité ne jugea pas possible de modifier cette démarche dans le rapport de 1964. Toutefois, il s'empressa d'ajouter que les données publiées depuis 1962 l'avaient conduit à admettre qu'il était possible, pour certains tissus et surtout dans la gamme des doses élevées, de procéder à des estimations du risque qui seraient valables dans la gamme des doses observées et dans les conditions données d'irradiation. Il tenait pour improbable que le risque par unité de dose aux doses très faibles fût plus important qu'aux doses élevées; en fait, à des doses faibles, il était probablement très inférieur.

102. En 1964, des estimations de dose provisoires étaient devenues disponibles pour certains des survivants d'Hiroshima et Nagasaki et le Comité pensa, avec une quasi certitude, qu'elles n'étaient pas entachées d'une marge d'erreur supérieure au double ou au triple. Les nouvelles estimations de dose autorisaient à conclure que l'incidence annuelle de la leucémie radioinduite était approximativement proportionnelle à la dose dans la gamme des 100 à 900 rads environ, avec un coefficient de proportionnalité compris entre 1 et 2 cas par million et par rad. Comme les survivants japonais avaient pu faire l'objet d'une sélection due aux effets létaux de l'irradiation elle-même, le Comité mit en garde contre l'application inconsidérée de cette estimation du risque à la population générale. L'estimation obtenue pour les survivants des bombardements atomiques concordait avec celle établie pour les patients spondylitiques traités par radiothérapie à des doses comprises entre 300 et 1 500 rads. Mais comme il s'agissait, là aussi, d'un groupe hautement sélectionné, l'estimation n'était rigoureusement applicable qu'aux patients atteints de spondylite.

103. De nouveaux résultats sur des enfants soumis à une irradiation prénatale semblaient indiquer que, pour eux, le risque de leucémie par unité de dose risquait d'être plusieurs fois supérieur au risque encouru par des adultes. Les doses reçues ne représentaient que quelques rads, ce qui indiquait que, dans certaines conditions, de faibles doses pouvaient induire des affections malignes. Mais, comme dans le cas de la spondylite ankylosante, il se pouvait que les enfants irradiés n'aient pas été représentatifs de l'ensemble des enfants.

104. Une estimation du risque de cancer de la thyroïde fut établie à partir d'études portant sur l'induction du cancer résultant d'une irradiation de la région thyroïdienne au cours de l'enfance. Le Comité estima le risque annuel à environ un cas par million et par rad sur un délai approximatif de 16 années après l'irradiation, dans la gamme de 100 à 300 rads. Une fois de plus, le Comité souligna qu'il pouvait s'agir de sujets hautement sélectionnés.

105. On savait à l'époque que les irradiations étaient responsables d'autres affections malignes, notamment de tumeurs des os, du foie, de la peau et du poumon; mais on ne jugeait pas les données suffisamment fiables pour procéder à des estimations du risque. Le Comité ne tablait guère sur la possibilité d'obtenir pareilles estimations pour bon nombre, sinon pour l'ensemble des tissus humains.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

Il conclut même que la leucémie pourrait bien être le type prédominant parmi les affections malignes radioinduites et que le risque global pour toutes les affections malignes ne devait pas excéder de beaucoup celui fourni pour la leucémie.

106. En 1972, le Comité décida de réexaminer la question de la radiocandérogénèse chez l'homme. Il souligna à cette occasion que, pour évaluer l'ampleur des effets dus aux rayonnements chez l'homme, il était essentiel d'obtenir des données empiriques tirées d'études épidémiologiques. Il convenait, en évaluant ces études, de tenir compte d'un certain nombre des difficultés qui leur étaient inhérentes et qui portaient notamment sur les questions suivantes : taille de la population étudiée, dosimétrie, période de latence, rapport avec l'incidence naturelle du cancer, statistiques de mortalité/morbidité, occultation due à l'interférence d'autres affections, rareté d'une irradiation vraiment uniforme de l'organisme entier. Le Comité débattit soigneusement chacun de ces points et aborda également pour la première fois la question du risque absolu et du risque relatif. Il souligna que le nombre de personnes exposées à des doses importantes était si faible que la relation entre la dose et l'incidence des affections malignes pouvait être étudiée seulement pour les tissus les plus radiosensibles.

107. Les observations recueillies sur l'induction de la leucémie indiquaient que l'incidence de cette maladie augmentait en fonction de la dose dans la gamme des 50 à 500 rads et qu'au-delà elle avait tendance à diminuer, peut-être en raison d'un effet de "destruction cellulaire" des fortes doses. Les leucémies radioinduites semblaient se manifester plus fréquemment dans un délai de quelques années après l'irradiation; au bout de 25 ans, la fréquence s'orientait vers un retour à la normale. Les observations indiquaient alors de 15 à 40 cas par million et par rad.

108. Il apparaissait qu'à Hiroshima des cancers du poumon avaient été induits par une exposition gamma externe à des doses de 30 à 100 rads. Les données mettaient en évidence un coefficient de risque s'échelonnant de 10 par million et par rad (à 250 rads) à 40 par million et par rad (à 30 rads) au cours des 25 premières années suivant l'exposition; cette estimation du risque était corroborée jusqu'à un certain point par les données concernant des patients traités pour spondylite ankylosante. Le Comité relevait aussi qu'il était possible d'établir une estimation du risque à partir des données sur les ouvriers des mines d'uranium mais qu'on ne pouvait accorder un grand crédit à cette estimation.

109. Le Comité évalua le coefficient de risque de cancer du sein chez les femmes exposées à Hiroshima, à 6 à 20 cas par million et par rad au cours des 20 premières années suivant l'exposition, pour des débits de dose de 60 à 400 rads. Ces évaluations étaient fondées sur la dosimétrie de 1965. Il estima que le risque moyen d'induction de cancers de la thyroïde était d'environ 40 par million et par rad, dans la gamme des 60 à 400 rads. Pour tous les autres cancers, sans indication précise du type, l'estimation de risque avancée sous toute réserve par le Comité était de 40 par million et par rad pendant les 25 premières années après une exposition à 250 rads. Pour un certain nombre de raisons, le Comité jugea que ces coefficients de risque correspondaient probablement à une surestimation du risque lié à l'exposition à des sources environnementales, à savoir des expositions à faible dose de sources naturelles ou artificielles.

110. Le rapport de 1977 contenait également une étude substantielle de la radiocancérogénèse chez l'homme. Après avoir longuement traité de la validité des données sur lesquelles pouvaient se fonder les estimations du risque, le Comité présenta ses estimations des coefficients de risque pour la leucémie et les tumeurs

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

d'un certain nombre d'organes. Il nota que le risque de contracter une affection maligne à des niveaux de dose d'environ 100 rads pouvait varier avec le TLE du rayonnement, parfois avec l'âge et le sexe du sujet, et probablement avec le débit de dose ou le fractionnement de la dose. Dans ce rapport, le Comité évoqua pour la première fois la mortalité entraînée par la leucémie et d'autres cancers. Auparavant, il avait toujours présenté ses estimations du point de vue du risque de cancer et non de celui de la mortalité.

111. La thyroïde et le sein semblaient être les organes présentant les plus forts taux d'induction, assortis de coefficients de risque se situant dans la région de 100 par million et par rad. On estima que le faible taux de mortalité des cancers radioinduits de la thyroïde et le taux relativement faible des cancers du sein établissaient le risque de mortalité pour ces deux affections au dixième et à la moitié respectivement de la valeur citée du taux de risque. Le cancer du poumon comportait également un taux élevé d'induction parmi les hommes âgés de plus de 35 ans, à en juger par les résultats obtenus pour les ouvriers de mines d'uranium. Le Comité jugea que, pour un cancer du poumon, on avait vraisemblablement affaire à un taux moyen, tous âges réunis, de l'ordre de 25 à 50 par million et par rad.

112. Il apparut que l'induction de la leucémie, dont on spécifia qu'il s'agissait des formes aiguë et myéloïde chronique (et non de la forme lymphoïde chronique), s'accompagnait d'un risque qui variait de 50 par million et par rad environ pour des doses modérément élevées à 20 par million et par rad environ pour des doses inférieures. Selon le Comité, il y avait tout lieu de penser que cette estimation englobait l'ensemble des cas susceptibles d'apparaître puisque, dans la leucémie radioinduite, le délai moyen observé entre l'exposition et le décès n'était que d'une dizaine d'années. Il était plus difficile d'estimer le nombre total de cas susceptibles d'être radioinduits en ce qui concernait les autres cancers ayant une période de latence de vingt-cinq ans ou plus.

113. Le Comité communiqua également pour d'autres organes des coefficients de risque s'établissant approximativement aux valeurs suivantes : estomac, foie et gros intestin, cerveau et glandes salivaires : 10 à 15 par million et par rad; os, oesophage, intestin grêle, vessie, pancréas, rectum et tissu lymphatique : 2 à 5 par million et par rad. Enfin, pour la peau, il estima que le risque d'induction et le taux de mortalité étaient faibles.

114. Le Comité aborda également la question de l'estimation du risque total de l'ensemble des tumeurs mortelles, observant d'emblée que ce risque pourrait être quatre à six fois plus élevé que pour la seule leucémie. Aux doses de quelques rads auxquelles pouvait correspondre le taux inférieur, pour la leucémie, d'environ 20 par million et par rad, on obtenait pour l'ensemble des affections malignes à évolution fatale, leucémie comprise, un taux atteignant environ 100 par million et par rad qui allait jusqu'à environ 250 par million et par rad avec des doses élevées. Selon les estimations, le coefficient de risque pour les tumeurs non malignes devait être sensiblement égal à celui des cancers mortels. Le Comité souligna une fois de plus que cette estimation pour les doses faibles était calculée à partir du nombre de cas mortels induits par des doses supérieures à 100 rads; aux niveaux dus à la radioexposition professionnelle, et plus encore aux niveaux dus à l'exposition au rayonnement naturel, la valeur correspondante était vraisemblablement nettement moindre.

115. Selon toute probabilité, des affections malignes pouvaient être induites par une exposition <u>in utero</u> du foetus dans la gamme de doses moyennes de 0,2 à 20 rads

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

due aux examens radiodiagnostiques. Le Comité jugea difficile d'établir des taux d'induction fiables, mais estima que ceux-ci étaient de l'ordre de 200 par million et par rad.

116. En raison du faible nombre de données épidémiologiques nouvelles communiquées depuis le rapport de 1977 et la révision qui venait de commencer des estimations dosimétriques relatives aux survivants des bombardements atomiques d'Hiroshima et de Nagasaki, le Comité décida de ne pas examiner la radiocancérogénèse humaine dans son rapport de 1982. Mais il ajouta qu'il ne s'attendait pas à ce que les révisions en cours augmentent de plus du double les estimations du risque précédentes. Jusqu'en 1971, les estimations du Comité pour le cancer sont récapitulées au tableau 3; elles sont exprimées en nombre de cas par sievert pour faciliter les comparaisons avec des estimations ultérieures.

Tableau 3

Récapitulation des estimations du Comité relatives au risque de cancer mortel

(En pourcentage par sievert) a/

Tissu	Rapport			
	1958	1964	1972	1977
Moelle osseuse	0,2-0,5	0,01-0,02 a/	0,15-0,40	0,20-0,50
Sein	-	-	0,06-0,20	0,50
Poumon	-	-	0,10-0,40	0,25-0,50
Thyroïde	-	0,16	0,40	0,10
Estomac	-	-		0,10-0,15
Foie	-	-		0,10-0,15
Cerveau	-	-		0,10-0,15
Glandes salivaires	-	-		(0,10-0,15) b/
Gros intestin	-	-		0,10-0,15
Intestin grêle	-	-		(0,02-0,05)
Os	-	-	0,40	(0,02-0,05)
Oesophage	-	-		(0,02-0,05)
Vessie	-	-		(0,02-0,05)
Pancréas	-	-		(0,02-0,05)
Rectum	-	-		(0,02-0,05)
Muqueuse des sinus de la face	-	-		(0,02-0,05)
Tissu lymphatique	-	-		(0,02-0,05)
Peau	-	-		Faible
Total estimé	-	-	-	1,0-2,5

a/ Par an.

b/ Les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre total de cas, aucune estimation n'ayant été faite du nombre de cas mortels.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

3. Effets non stochastiques

a) Irradiation de l'adulte

117. Le Comité a élaboré à diverses reprises la question des effets somatiques radioinduits en expérimentation animale et chez l'homme. La première analyse remonte au rapport de 1958 qui s'efforçait de résumer 60 années de connaissances, à une époque où ce que l'on savait des lésions radioinduites et de leur pathogénie restait assez approximatif. Bien que le Comité ne possédât guère d'éléments précis pour asseoir une discussion, le tableau général qui se dégageait de l'analyse paraissait cohérent, notamment pour les effets induits par des doses élevées. Le Comité connaissait alors les principaux facteurs qui influaient sur l'induction de ces effets, à savoir notamment la dose, le débit de dose, le fractionnement et la qualité du rayonnement. Il livrait également une description des principales variables biologiques : espèce, âge, sexe et irradiation partielle de l'organisme entre autres.

118. Le rapport de 1958 énonçait les principales notions radiobiologiques comme la sensibilité cellulaire et la réponse tissulaire telles qu'elles se manifestaient dans le taux de division et de différenciation cellulaire. Par contre, la notion de létalité cellulaire ne pouvait pas être quantifiée car on ne disposait pas encore des techniques de culture monocellulaire. On employait aussi le terme de "restauration" dans un sens assez vague, sans identifier les divers mécanismes sous-jacents. La classification des effets en "morphologiques" et "fonctionnels" posait quelques problèmes, mais dès ce premier stade, le Comité avait bien cerné les difficultés rencontrées quand il s'agit d'apprécier si l'on a ou non affaire à un seuil, notamment pour les doses faibles et les effets tardifs.

119. Ce sont essentiellement les mêmes critères qui furent utilisés en 1962 pour classer les effets somatiques en "précoces" et "tardifs", si bien que des effets très différents des tumeurs et des leucémies, comme l'opacification du cristallin, l'induction de la stérilité ou la réduction non spécifique de la longévité, furent classés avec celles-ci tout simplement parce qu'eux aussi apparaissaient tardivement. Le rapport de 1962 ne s'écarta pas foncièrement des généralisations ci-dessus, notamment en ce qui concernait la forme des relations dose-effet, l'incertitude entourant sa détermination précise pour les doses inférieures à celles directement étudiées et la dépendance marquée des effets par rapport au débit de dose.

120. Vingt ans s'écoulèrent entre ce premier rapport et celui de 1982; une longue annexe fut consacrée à l'examen des effets non stochastiques des rayonnements sur les tissus normaux. La manière nouvelle dont le sujet fut traité témoigne alors des progrès spectaculaires accomplis entre-temps dans la compréhension des effets somatiques. Le titre même de l'annexe donne à entendre qu'il avait été opéré une reclassification des effets puisqu'on distinguait les effets "stochastiques" des effets "non stochastiques". A la première catégorie appartenaient les effets pour lesquels seule la probabilité d'induction était fonction (linéaire) de la dose; à la seconde ceux pour lesquels la gravité (ainsi que la probabilité pour un degré donné de gravité) était fonction (sigmoïde) de la dose. Le rapport examina principalement les effets de l'irradiation de divers organes et tissus à partir d'une masse importante de données concernant l'homme interprétées à la lumière des enseignements de l'expérimentation animale.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

121. Le Comité envisagea la nature de ces effets, leur pathogénie résultant de l'interaction de la destruction cellulaire et de la cinétique tissulaire, de même que les relations quantitatives rattachant ces effets à la durée et au degré du dommage clinique non stochastique. Sur un plan plus général, le Comité conclut à l'existence d'une dose seuil dans l'induction de ces effets, ce seuil variant selon le type d'effet décrit. Une annexe a également été consacrée à une analyse détaillée des modalités prévues de variation de la dose seuil, pour chaque type particulier d'effet, en fonction des principales variables radiobiologiques telles que la qualité du rayonnement, la dose, le débit de dose, le fractionnement et l'étalement de la dose.

b) Irradiation prénatale

122. Dès son premier rapport (1958), le Comité signala que les tissus de l'embryon et du foetus pouvaient être particulièrement sensibles à l'action des rayonnements et que la radioexposition de femmes enceintes risquait d'entraîner des effets tératologiques dans le produit de la conception. En outre, on admettait déjà à l'époque la notion de périodes critiques du développement embryonnaire au cours desquelles certaines structures pouvaient être particulièrement vulnérables à l'action spécifique de l'irradiation interne ou externe. Enfin, le rapport examina le problème de la forme dose-réponse pour les effets in utero sans préciser leur nature ou leur mécanisme d'induction, et tout en suggérant que ces relations devaient comporter un seuil.

123. Le rapport de 1962 réaffirma la notion d'une sensibilité particulière des structures foetales et embryonnaires en soulignant que des lésions mineures survenant au cours du développement pouvaient être amplifiées par la croissance de ces structures et aboutir ainsi à des anomalies majeures. Des études menées chez la souris au stade de prénidation permirent de conclure que des doses de 0,25 Gy administrées à l'embryon étaient létales chez 40 % des animaux. Le Comité conclut aussi, en se fondant sur un ensemble assez vaste de résultats expérimentaux alors disponibles, que l'irradiation au cours de la phase essentielle de l'organogenèse aboutissait à des malformations du développement et que l'on relevait une bonne concordance des structures malformées chez l'animal et chez l'homme pour des stades correspondants du développement. Chez l'homme, les malformations les plus fréquentes intéressaient le système nerveux central, l'oeil et le squelette.

124. Dans le cadre d'un examen spécial des effets des rayonnements sur le système nerveux, contenu dans le rapport de 1969, le Comité accorda une attention particulière aux effets provoqués au niveau des structures cérébrales des mammifères en cours de développement. Il confirma que l'irradiation prénatale au moment de la différenciation des structures en question pouvait produire des anomalies graves du développement. Selon le moment de l'irradiation, des anomalies spécifiques (microcéphalie, encéphalocèle, hydrocéphalie) peuvent se produire chez l'homme par suite d'une cinétique à seuil et fonction de la dose. Il décrivit le processus de désorganisation de l'architecture corticale chez l'animal, aboutissant à un déficit fonctionnel qui se traduit par une perte de la discrimination visuelle, olfactive et spatiale. Chez l'animal, d'autres processus d'apprentissage étaient atteints après des doses de 1 Gy ou plus administrées à des rates au cours de la deuxième ou troisième semaine de gestation; les effets de doses inférieures à 0,5 Gy restaient incertains. Bien que des altérations des réflexes conditionnés aient été signalées chez des animaux irradiés en fin de gestation par des doses très faibles de 0,01 Gy, on estima également douteux que ces effets pussent servir à l'estimation du risque chez l'homme. Pour ce dernier, le Comité ne retint comme

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

effets réels que la petitesse du crâne et l'arriération mentale, mais il ne parvint pas à établir la moindre relation entre ces anomalies morphologiques et fonctionnelles et une altération structurelle quelconque au niveau du système nerveux central. Le Comité se hasarda quand même à calculer un coefficient de risque pour le retard mental chez les survivants d'Hiroshima et de Nagasaki : un par millier et par rad pour des doses de plus de 50 rads délivrées sous des débits élevés.

125. Tout en reconnaissant qu'il importait de continuer à observer les effets des rayonnements sur le développement et la croissance pour vérifier s'ils pouvaient s'appliquer à l'irradiation de populations et de travailleuses, le Comité entreprit une autre étude sur ce sujet qui fut publiée à l'annexe J de son rapport de 1977. L'étude était centrée sur les données expérimentales recueillies chez l'animal et sur les mécanismes d'induction des effets in utero; elle décrivait aussi les relations dose-temps calculées à partir de données plus quantitatives.

126. L'annexe J du rapport de 1977 procédait à une généralisation des périodes dites "de sensibilité maximale" des diverses structures anatomiques afin qu'elles coïncident avec les poussées de croissance; elle généralisait aussi à travers les espèces la notion que des effets létaux caractérisaient une irradiation à la phase de prénidation, des effets tératogènes à la phase essentielle de l'organogénèse et des troubles de la croissance à la phase foetale. L'analyse des relations dose-effet montrait que celles-ci étaient généralement curvilignes. Le Comité confirma sa précédente évaluation du risque de retard mental et suggéra, sur la base des données obtenues chez la souris, que l'on pouvait retenir un risque de 10^{-2} x R pour l'accroissement de la destruction embryonnaire peu après la fécondation.

127. Le Comité conclut de cet examen que, malgré l'extrême rareté des données sur la radioinduction de malformations chez l'homme, on relevait chez les autres espèces animales une concordance et une régularité telles des données indiquant une sensibilité marquée à ces effets que l'espèce humaine ne pouvait pas constituer à cet égard une exception. Bien qu'il estimât impossible, eu égard à l'insuffisance des données disponibles sur l'homme, de calculer des estimations quantitatives fiables du risque imputable à une irradiation prénatale chez l'homme à des stades comparables du développement, notamment aux doses et débits de dose faibles, le Comité fut en mesure d'exclure que la sensibilité de l'espèce humaine pût être 10 fois supérieure à ce que laissaient supposer d'autres données expérimentales.

4. Autres types de dommage

128. A divers moments et dans différents rapports, le Comité accorda une attention particulière à d'autres types de dommage qui sont difficilement classables parmi ceux que l'on vient d'évoquer. Il s'agit par exemple de la réduction de la longévité dont le rapport de 1958 signalait qu'elle résultait d'un certain nombre d'altérations radioinduites aiguës ou tardives, tantôt spécifiques, comme la leucémie des radiologues, tantôt généralisées à l'ensemble des tissus ou organes. On pensait que, dans ce dernier cas, les troubles provoquaient une accélération des processus normaux du vieillissement, et l'on appelait ce phénomène "réduction non spécifique de la longévité".

129. Le Comité réalisa une étude spéciale des effets radioinduits dits de vieillissement et en présenta les résultats dans son rapport de 1982. Il apparut qu'on manquait d'une base solide pour donner du vieillissement une définition

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

biologique précise et postuler ainsi que des effets non spécifiques dus à des doses et des débits de dose faibles pouvaient occasionner chez l'animal un vieillissement prématuré. Le Comité s'attacha donc à étudier l'action des rayonnements sur la réduction de la longévité, autrement dit un effet que l'on peut définir plus objectivement. Aux doses qui sont les plus intéressantes en pratique et qui se situent donc bien au-dessous de la gamme de la DL_{50} jusqu'aux doses et débits de dose les plus faibles, il ressortait d'une masse écrasante d'observations que les animaux irradiés vivaient en moyenne moins longtemps que les témoins non irradiés.

130. Cet effet de réduction de la longévité entretient avec la dose et le temps des relations précises. Un vaste ensemble d'indices tirés de l'expérimentation animale permirent au rapport de conclure que, dans la gamme des doses et débits de dose faibles à intermédiaires, la réduction de la longévité était essentiellement due à l'induction d'affections malignes dont l'incidence était supérieure au taux normal pour l'espèce étudiée. Cette conclusion était valable pour les animaux de laboratoire, mais aussi pour l'homme, pour autant qu'on puisse en juger d'après les éléments plus restreints disponibles à propos de ce dernier.

131. Dans son rapport de 1969, le Comité présenta une étude spéciale consacrée aux effets des rayonnements sur le système nerveux. Cette étude couvrait tous les aspects se rapportant aux troubles morphologiques et fonctionnels résultant d'une irradiation aux stades prénatals. L'irradiation du système nerveux ne peut entraîner d'effets chez l'adulte qu'aux fortes doses, auquel cas ces effets s'accompagnent de profondes altérations structurelles et fonctionnelles. On admit toutefois que, pour des doses faibles égales ou inférieures à 0,1 Gy, des réactions "de nature physiologique" pouvaient être induites. Le résultat le plus saillant restait l'énorme différence de sensibilité selon que l'irradiation était délivrée au stade prénatal ou postnatal, la vulnérabilité étant beaucoup plus élevée dans le premier.

132. Le même rapport contenait une annexe distincte sur l'induction d'aberrations chromosomiques dans les lignées de cellules germinales et de cellules somatiques chez l'homme. L'induction d'aberrations chromosomiques dans les cellules somatiques est un effet intéressant car il peut servir de dosimètre in vivo et joue un important rôle biologique dans la genèse des affections malignes (ou en relation avec elles). L'annexe traitait de manière approfondie des relations dose-temps dans l'induction du dommage chromosomique et de la variabilité des aberrations en fonction d'autres agents physiques et biologiques. En conclusion, l'analyse chromosomique, en dehors de ses applications en dosimétrie biologique, n'offrait que peu d'intérêt pour évaluer le risque radioinduit d'effets néoplasiques, immunologiques ou réducteurs de la longévité. On devait continuer à fonder les estimations de risque sur les incidences relevées de cas cliniques particuliers en fonction de la dose. Cette conclusion a gardé jusqu'à ce jour toute sa valeur.

133. Le rapport de 1972 contenait une étude spéciale sur les effets des rayonnements sur le système immunitaire. Se fondant surtout sur les données expérimentales, le Comité s'employa à examiner le rôle du système immunitaire dans l'apparition des effets précoces et tardifs des rayonnements, soit essentiellement des effets de type non stochastique. L'étude conclut que le système immunitaire comportait d'importants facteurs de sécurité intrinsèques qui lui permettaient de résister à des lésions appréciables provoquées par les rayonnements et même d'assurer leur réparation. Le Comité considéra que, pour des doses de l'ordre de 0,1 Gy au corps entier, on pouvait observer des dommages occasionnés au système immunitaire, mais que ces dommages n'étaient guère préoccupants. Des doses au

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

corps entier accrues d'un ordre de grandeur étaient en mesure d'augmenter la susceptibilité à l'infection, alors que des doses égales ou supérieures à 2 Gy pouvaient s'accompagner d'une hausse importante du risque de mortalité par infection. Ces conclusions semblent également valables pour les effets non stochastiques.

134. Une autre étude fut consacrée aux interactions éventuelles des rayonnements et d'autres agents amplement répartis dans l'environnement. Elle figurait aussi dans le rapport de 1982. Le Comité y a examiné en particulier les conditions d'exposition affectant un grand nombre de personnes et modifiant ainsi sensiblement les coefficients de risque moyen.

135. Le Comité a estimé que, pour des effets revêtant une grande importance pratique (induction de cancers, effets génétiques ou anomalies du développement), peu d'informations systématiques venaient étayer l'assertion d'interactions non additives des rayonnements et d'autres agents. Les analyses théoriques effectuées qui étaient accompagnées d'exemples tirés de travaux expérimentaux ou épidémiologiques, traitaient cette question dans toute sa complexité : la diversité de nature des agents interagissants, la diversité de leurs mécanismes d'action, les niveaux de dose différents et le mode d'administration de ces doses étaient susceptibles d'entraîner une grande variété d'interactions possibles, que celles-ci soient additives, inhibitrices ou synergiques mais un seul cas de synergisme s'avérait bien établi, celui de la fumée de tabac associée aux produits de filiation du radon chez les ouvriers des mines d'uranium. Ce synergisme ne permettait pas d'extrapoler à la population générale les résultats obtenus chez les mineurs.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

III. SITUATION ACTUELLE

136. Le présent chapitre décrit les résultats et les conclusions auxquels le Comité est parvenu dans ses derniers rapports. Les données les plus récentes figurent dans le présent rapport (1988) mais pour certains thèmes qui ne sont pas traités ici - tel que celui des irradiations par les explosions nucléaires - il faut se référer au rapport de 1982.

A. Niveaux et doses de rayonnement

1. Sources naturelles de rayonnement 3/

137. Il est tout particulièrement important d'évaluer les doses de rayonnement d'origine naturelle auxquelles est exposé l'être humain car le rayonnement naturel est de loin le principal responsable de la dose collective reçue par la population mondiale. Les sources naturelles de rayonnement peuvent être regroupées en :

a) Sources externes d'origine extra-terrestre (autrement dit rayonnement cosmique) et rayonnement d'origine terrestre (c'est-à-dire provenant des nucléides radioactifs présents dans la croûte terrestre, dans les matériaux de construction et dans l'air);

b) Sources internes, y compris les radionucléides présents dans la nature et qui sont incorporés dans l'organisme humain.

138. Certaines des contributions à l'exposition totale qui proviennent du fond naturel de rayonnement sont relativement constantes dans l'espace et dans le temps et sont quasiment indépendantes des pratiques et des activités humaines. C'est le cas par exemple des doses reçues par ingestion de potassium-40, élément dont le niveau reste réglé homéostatiquement, ainsi que des doses dues à l'inhalation et à l'ingestion de radionucléides cosmogéniques qui sont distribués de façon homogène sur la surface du globe. D'autres expositions dépendent fortement des activités et des pratiques humaines et sont donc très variables. Les doses provenant de l'inhalation, à l'intérieur des bâtiments, des produits de décroissance radioactive du radon et du thoron en sont des exemples. La conception des bâtiments ainsi que le type de matériaux de construction et les systèmes de ventilation choisis ont une incidence sur les niveaux à l'intérieur des bâtiments de sorte qu'avec l'évolution des techniques et des pratiques, les doses reçues provenant du radon varient également. Entre ces deux types extrêmes d'exposition, on trouve des types intermédiaires : a) les doses externes imputables aux rayons cosmiques sur lesquelles les pratiques humaines ont une incidence, qu'il est tout à fait possible de prévoir mais non de moduler (sauf en allant s'installer dans une zone où la dose est plus faible); b) les doses dues à l'inhalation et à l'ingestion de radionucléides de période longue faisant partie des produits de la désintégration radioactive de l'uranium-238 et du thorium-232; ces radionucléides sont responsables d'un faible apport à la dose totale provenant de sources naturelles et leur présence dans l'espace est relativement constante; c) et les doses imputables à une irradiation externe d'origine terrestre qui sont aussi sensiblement modifiées par les activités et les pratiques humaines, particulièrement du fait de l'exposition à l'intérieur des bâtiments.

139. Le Comité a réévalué les doses reçues globalement des sources naturelles de rayonnement (tableau 4). L'équivalent de dose efficace annuel moyen obtenu est de 2,2 mSv; il se rapporte à la fraction adulte de la population. La variation autour

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

de ces moyennes est essentiellement due à l'exposition externe à des sources terrestres et à l'exposition interne (inhalation) à des produits de période courte de la désintégration radioactive d'isotopes du radon. Les expositions externes s'écartent généralement de la moyenne d'un facteur de 1,5 et les expositions internes d'un facteur de 2,5. Pour ces deux types d'exposition, les valeurs extrêmes s'écartent de la moyenne d'un facteur de 100. Par rapport aux estimations contenues dans le rapport de 1982, il y a eu plusieurs changements :

a) En ce qui concerne la radioexposition externe due au rayonnement cosmique, le nouveau chiffre des estimations des équivalents de dose efficace annuels dus au rayonnement ionisant est supérieur de 50 microsieverts en raison de la prise en compte de la répartition géographique de la population mondiale en fonction de l'altitude de l'effet protecteur des matériaux de construction;

b) Dans le cas de la radioexposition externe à des sources terrestres de rayonnement, les estimations de l'équivalent de dose efficace annuel ont été relevées de 60 microsieverts car on connaît mieux maintenant les doses du rayonnement gamma de l'air absorbées à l'intérieur des batiments;

c) Les estimations relatives aux équivalents de dose efficace annuels provenant d'une radioexposition interne aux radionucléides naturels ont été légèrement réduites dans le cas des familles de l'uranium-238 et du plomb-210 ainsi que des produits de la désintégration radioactive du radon-220, alors qu'en ce qui concerne les produits de la désintégration radioactive de période courte du radon-222, elles ont été relevées d'environ 300 microsieverts sur la base de certains résultats provisoires d'enquêtes nationales sur l'irradiation à l'intérieur des bâtiments.

Toutes ces corrections se traduisent par un accroissement net de 20 % de l'estimation globale de l'équivalent de dose efficace annuel d'origine naturelle.

141. Le tableau 4 montre l'importance capitale des doses provenant de l'inhalation du radon-222 et de ses produits de la désintégration radioactive de période courte. Les activités industrielles qui libèrent des matières contenant des concentrations accrues de radionucléides présents dans la nature n'ont pas d'incidences appréciables sur les estimations globales quant à la radioexposition.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

Tableau 4

Equivalents de dose efficace annuelle due à des sources naturelles

Source d'irradiation	Equivalent de dose efficace annuelle (mSv) Irradiation Externe	Irradiation Interne	Total
Rayons cosmiques			
Rayonnement ionisant direct	0,30	-	0,30
Neutrons	0,055	-	0,055
Radionucléides cosmogéniques	-	0,015	0,015
Radioniucléides naturels :			
Potassium-40	0,15	0,18	0,33
Rubidium-87	-	0,006	0,006
Famille radioactive de			
l'uranium-238 :	0,1	1,24	1,34
Uranium-238 à uranium 234		0,005	
Thorium-230		0,007	
Radium-226		0,007	
Radon-222 à polonium-214		1,1	
Plomb-210 à polonium-210		0,12	
Famille radioactive du thorium-232 :	0,16	0,18	0,34
Thorium-232		0,003	
Radium-228 à radium-224		0,013	
Radon-220 à tellurium-208		0,16	
Total	0,8	1,6	2,4

2. Explosions nucléaires

142. Dans son rapport de 1982, le Comité a évalué les radioexpositions de la population mondiale dues au rejet, dans l'environnement, des matières radioactives produites par les explosions nucléaires effectuées dans l'atmosphère depuis 1945. Aucun essai nucléaire dans l'atmosphère n'ayant eu lieu depuis 1980, l'évaluation reste complète et valable.

143. Le tableau 5 indique le nombre et la puissance des explosions nucléaires dans l'atmosphère. Il fait apparaître que les principaux programmes d'essais ont eu lieu de 1954 à 1958 et de 1960 à 1962. Sous l'effet d'explosions de forte puissance, des débris radioactifs pénètrent dans la stratosphère d'où ils se dispersent et retombent sur l'ensemble de la planète (phénomène connu sous le nom de retombées radiaoctives). Les populations les plus exposées sont celles des régions tempérées et de l'hémisphère nord où ont eu lieu la plupart des essais. L'engagement de dose relatif à la zone tempérée de l'hémisphère sud est égal environ à 70 % de celle de la zone tempérée de l'hémisphère nord. Les doses de rayonnement sont imputables essentiellement à l'ingestion des radionucléides qui se retrouvent dans les aliments ainsi qu'à l'irradiation externe résultant des radionucléides qui se déposent dans le sol.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

Tableau 5

Nombre et puissance des explosions nucléaires dans l'atmosphère

Année	Nombre	Puissance estimée (Mt)	
		Fission	Total
1945-1951	26	0,8	0,8
1952-1954	31	37,0	60.0
1955-1956	44	14,0	31,0
1957-1958	128	40,0	81,0
1959-1960	3	0,1	0,1
1961-1962	128	102,0	340,0
1963	0	0,0	0,0
1964-1969	22	10,6	15,5
1970-1974	34	10,0	12,2
1975	0	0,0	0,0
1976-1980	7	2,9	4,8
1981-1987	0	(pas d'autres essais)	

144. Les principaux radionucléides responsables des engagements de dose évalués pour les différentes parties du monde et provenant de l'ensemble des essais dans l'atmosphère effectués jusqu'à présent sont, par ordre d'importance décroissante les éléments ci-après : carbone-14, caesium-137, zirconium-95, strontium-90, rubidium-106, cerium-144 et tritium. Parmi ceux-ci, le carbone-14, le caesium-137, le strontium-90 et le tritium n'exposeront plus la population mondiale actuelle et future qu'à une irradiation résiduelle. Le plutonium-239, le plutonium-240 et l'americium-241 ajouteront une irradiation supplémentaire d'environ 0,1 % de l'engagement d'équivalent de dose efficace total, à de trop faibles débits de doses, sur des milliers d'années.

145. Dans le rapport de 1982, le Comité a estimé à 3×10^7 homme Sv l'engagement d'équivalent de dose efficace collectif résultant de toutes les esxplosions nucléaires effectuées dans l'atmosphère, estimation qui reste valable. Ce chiffre, qui tient compte des estimations de l'accroissement de la population mondiale a été jugé équivalent à environ 4 ans de l'exposition à des sources naturelles à laquelle la population était soumise à la fin des années 70, sur la base d'une exposition annuelle par tête à un rayonnement naturel de 2 mSv et d'une population mondiale de 4×10^9. Sur la base de l'accroissement de la population mondiale (qui atteint aujourd'hui environ 5×10^9 d'êtres humains) et de l'estimation révisée de l'exposition annuelle par tête aux sources naturelles de rayonnement, qui est de 2,4 mSv, l'engagement d'équivalent de dose efficace collectif dû à toutes les explosions nucléaires dans l'atmosphère équivaudrait selon les estimations actuelles, à environ trois années d'exposition de la population aux sources naturelles de rayonnement.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

3. Production d'énergie d'origine nucléaire 4/

146. Le nombre de réacteurs nucléaires qui servent à produire de l'électricité a augmenté depuis la publication du rapport de 1982. A la fin de 1987, les 417 réacteurs en service dans 26 pays, avaient une puissance installée totale de 298 GW. Ceci représente un accroissement de 100 % de la puissance installée depuis le dernier rapport du Comité en 1982 qui indiquait une puissance installée de 144 GW. Les prévisions à l'horizon 2000 demeurent assez floues mais sont de l'ordre de 500 GW, soit 80 % de plus qu'actuellement.

147. Le cycle du combustible nucléaire comporte plusieurs étapes : l'extraction et le traitement des minerais d'uranium; l'enrichissement en uranium-235 pour certains types de réacteurs; la fabrication des éléments combustibles; la production d'énergie dans les réacteurs; le retraitement, qui n'a cependant pas toujours lieu, du combustible irradié et le recyclage des matières fissiles et fertiles extraites; le transport des matières nucléaies entre les diverses installations du cycle du combustible; finalement, l'évacuation des déchets radioactifs. Bien que la plupart des matières radioactives liées à la production d'énergie d'origine nucléaire soient présentes dans le combustible irradié, de petites quantités sont rejetées dans l'environnement par l'intermédiaire des effluents à chaque étape du cycle. La plupart de ces rejets ne présentent qu'un inconvénient local ou régional car ces radionucléides sont de période courte et ont une mobilité réduite dans l'environnement. Néanmoins certains nucléides, en raison de leur période longue ou de la rapidité avec laquelle ils sont transférés par l'environnement, peuvent accroître l'irradiation de la population mondiale.

148. A chaque étape du cycle du combustible, avec le rejet de matériaux radioactifs qui l'accompagne, le Comité a évalué les doses aux personnes travaillant à l'intérieur des installations nucléaires ainsi qu'aux membres du public, dues aux rejets de substances radioactives. Quatre groupes de population ont été considérés dans ces évaluations : les personnes qui sont exposées en situation normale du fait de leur travail dans le cadre du cycle du combustible; la population vivant dans un rayon d'une centaine de kilomètres de la centrale; la population dans un rayon de quelques milliers de kilomètres; et enfin, la population mondiale.

149. Les concentrations de radionucléides dans les effluents sont généralement faibles et soumettre la population à une surveillance radiologique individuelle afin d'évaluer l'absorption des radionucléides n'est guère faisable et n'est pas commode. Le Comité a donc recouru à l'établissement de modèles de l'environnement pour estimer les doses à de grandes distances des centrales. Il est possible de prévoir le transfert de radionucléides par l'environnement à partir des mesures fournies par la surveillance radiologique des aliments et de l'eau ainsi que par les études expérimentales.

150. Pour établir ces modèles de l'environnement, on part des données quantitatives et qualitatives relative aux rejets de matières radioactives par les diverses installations nucléaires. Les pays ayant des programmes nucléo-énergétiques communiquent généralement ces renseignements au Comité qui les a recueillis pour les six années allant de 1980 à 1985. Le volume des rejets à un stade donné du cycle du combustible nucléaire étant porportionnel à la capacité de production nucléaire de ce stade, les rejets ont été exprimés en gigawatts par an d'électricité produite, ce qui permet d'établir des comparaisons et de faciliter l'utilisation de moyennes pour toutes les centrales de conception similaire; ces

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

résultats ne correspondent pas à des sites particuliers mais indiquent l'impact de chaque type d'installations. En faisant la moyenne des résultats pour toute la production d'électricité, et pour toutes les centrales d'un type donné, on tient également compte des rejets qui peuvent se produire pendant les périodes d'arrêt nécessitées par l'entretien pendat lesquelles la production d'électricité est nulle ou faible.

151. Pour évaluer les doses collectives correspondant aux rejets normalisés, le Comité avait commencé par définir des sites théoriques présentant en gros les caractéristiques correspondant à chaque stade du cycle du combustible; extraction et traitement des minerais, enrichissement et fabrication, exploitation du réacteur et retraitement. Le Comité avait également retenu, comme environnement recevant les rejets de chaque installation du modèle, un environnement théorique regroupant les principales caractéristiques des sites existants de façon à inclure les voies critiques à l'homme les plus couramment observées. Le Comité a réutilisé les mêmes modèles, estimant qu'ils conviennent toujours à ses travaux et qu'ils permettent de comparer plus facilement les impacts actuels avec ceux de la période 1974-1979.

152. Les mines d'uranium rejettent des effluents qui, dans les mines souterraines, s'échappent principalement par l'air de ventilation et, dans les mines de surface, se déversent dans le puits. D'autres effluents sont produits au cours des opérations de traitement du minerai visant à l'extraction de l'uranium. Les stocks de minerai et autres minéraux extraits constituent également une source d'émission transmise par l'air lorsque la mine est en activité. Cette source continue à émettre des effluents même après la fermeture de la mine. Les résidus du traitement sont également une source à long terme d'émissions transmises par l'air. Le radon-222 est le radionucléide qui joue le rôle le plus important dans ces émissions. Sur la base des mêmes modèles généraux que ceux qui avaient servi de base au rapport de 1982, les doses ont été évaluées tant pour la période d'exploitation qu'à long terme (10^4 années). Les doses correspondant à la fabrication et au transport ont également été évaluées. Toutefois, ces doses étant beaucoup plus réduites que celles qui émanent d'autres composantes du cycle du combustible nucléaire, elles n'ont pas été examinées séparément.

153. L'exploitation des centrales nucléaires et des centrales de retraitement donne lieu à la production des déchets solides qu'il convient d'éliminer. A des fins d'analyse, ces déchets ont été définis par leur volume et par la concentration radioactive d'importants radionucléides par unité d'énergie créée. Le Comité a mentionné deux types courants d'installations d'élimination des déchets (par ensevelissement peu profond) et utilisé des modèles de dispersion terrestre pour calculer les taux de rejet de radionucléides et les équivalents de dose efficace qui en résultent.

154. Les seules installations de retraitement du combustible exploitées industriellement sont celles de Sellafield, au Royaume-Uni, et du Cap de la Hague et de Marcoule, en France. Dans son rapport de 1982, le Comité a évalué les incidences du retraitement en utilisant une installation théorique représentative de celles qui devraient servir à l'avenir à retraiter le combustible à base d'oxydes. Actuellement, le combustible retraité dans les trois installations correspond à une production d'énergie qui équivaut à environ 10 % de toute celle des centrales nucléaires. Le Comité a donc décidé d'évaluer les incidences des quantités effectivement rejetées par les installations de retraitement exploitées industriellement et qui lui sont communiquées et d'affecter à ces quantités un coefficient de pondération constitué par les doses collectives résultantes par fraction de combustible retraité, de façon à obtenir les valeurs de l'exposition par GW/an produit.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

155. Pour calculer la dose collective à l'ensemble de la population mondiale et à divers sous-groupes, il est nécessaire de choisir des hypothèses quant à la taille de ces populations, à leurs habitudes alimentaires et autres ainsi qu'à leurs pratiques en matière d'agriculture et de pêche. Le Comité avait déjà utilisé des valeurs largement représentatives qu'il a conservées pour évaluer l'incidence radiologique de chaque étape du cycle du combustible.

156. Le tableau 6 présente les estimations de l'équivalent de dose efficace collectif aux populations locales et régionales ainsi qu'à la population mondiale dû à des des radionucléides largement répandus. Les radioexpositions professionnelles par GW/an sont approximativement le triple de celles qui sont reçues par la population locale et la population régionale.

Tableau 6

Doses collectives par unité de production d'électricité d'origine nucléaire

(Homme Sv par GW/an)

	Au cours des 100 prochaines années	Total, sans limite de temps
Résidus de traitement (radon), à long terme	1,5	150 a/
Nucléides et déchets à dispersion mondiale	6,0	60
Expositions locales et expositions régionales	4,0	4
Radioexpositions professionnelles	12,0	12
Total	24,0	230

a/ Au cours de 10 000 ans.

157. Les estimations de doses reçues par le public ont été réduites, notamment du fait que les rejets des réacteurs dans l'environnement ont généralement diminué. En outre, l'estimation relative au carbone-14, élément responsable de la moitié de l'exposition du public aux rejets courants des réacteurs est beaucoup plus faible que celle qui était mentionnée dans le rapport de 1982 car les valeurs des rejets mesurés de carbone-14 provenant des réacteurs à eau lourde ont diminué.

158. L'exposition annuelle provenant du rejet de radionucléides dont la dispersion se fait sur toute la planète est bien inférieure à l'exposition de la population locale et régionale. Ce n'est que si les rejets de ces radionucléides se maintiennent aux niveaux actuels et que tout le combustible provenant des réacteurs est retraité que la fraction mondiale de l'équivalent annuel de dose efficace collectif finira par atteindre le même niveau que celui des doses locales et régionales.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

159. Il est possible de comparer les doses collectives et les doses par tête provenant de la production d'électricité à partir de l'énergie nucléaire aux doses à la population mondiale imputables aux sources naturelles de rayonnement. La fraction la plus immédiatement délivrée de l'engagement de l'équivalent de dose efficace collectif normalisé a été évaluée à 4 homme Sv par GW/an en ce qui concerne les radionucléides contenus dans les affluents des installations du cycle du combustible nucléaire. A la production actuelle annuelle d'énergie d'origine nucléaire, qui est d'environ 180 GW/an correspond une dose collective annuelle évaluée à 760 homme Sv. En divisant ce chiffre par celui de la population mondiale, qui est de 5×10^9, on obtient la dose annuelle estimée par tête, soit 0,15 microsievert. Ces doses correspondent à environ 0,01 % des doses collectives et des doses par tête dues au rayonnement naturel.

4. Radioexpositions à des fins médicales 5/

160. On dispose d'un ensemble satisfaisant de données sur la fréquence des examens et sur les doses absorbées à la suite d'examens médicaux, surtout dans les pays développés qui regroupent moins d'un quart de la population mondiale. Pour un autre quart environ, on possède des renseignements fragmentaires sur la fréquence des examens ou le nombre des unités de diagnostic; et pas ou presque pas de renseignements sur les doses absorbées. Au sujet de la moitié restante de la population mondiale, il n'existe absolument aucune donnée. Pour cette raison, le Comité a mis au point une méthode d'établissement de modèle qui repose sur la corrélation satisfaisante qui existe, dans la plupart des pays, entre le nombre d'habitants par médecin (que l'on connaît mieux) et les applications médicales des rayonnements.

161. Actuellement, la pratique du diagnostic est très inégalement répandue dans le monde : certains pays possèdent un appareil à rayons X par moins de 2 000 habitants et d'autres un appareil par 100 000 à 600 000 habitants. La fréquence des procédures est aussi très inégale : de 15 à 20 par an par millier d'habitants dans certaines régions et de 1 000 à 2 000 par an dans d'autres. Actuellement, la population mondiale est de 5×10^9 êtres humains et certains estiment que plus des trois quarts d'entre eux n'ont aucune chance de bénéficier d'un examen radiologique quelconque, quelle que soit la maladie dont ils sont atteints.

162. Bien qu'il existe des données sur la dose absorbée correspondant à de nombreuses procédures classiques de radiographie et de médecine nucléaire, les informations dont on dispose actuellement indiqueraient que les précédentes estimations de la dose absorbée pour la population mondiale étaient un peu faibles, l'usage répandu de la radioscopie dans les pays en développement est une des principales causes de cette sous-estimation. A cela vient s'ajouter l'existence d'un grand nombre d'appareils défectueux produisant des doses élevées. Jusqu'à présent, on n'avait pas tenu vraiment compte de ces facteurs.

163. L'équivalent de dose efficace dû aux procédures de diagnostic aux rayons X est beaucoup plus élevé que celui qui résulte des examens dentaires ou des examens diagnostiques de médecine nucléaire. L'équivalent de dose efficace annuel par tête n'est probablement pas inférieur à 0,4 mSv (précédente estimation du Comité) et pas supérieur à 1,0 mSv. De même, la dose génétiquement significative annuelle risque de se situer entre 0,1 et 0,3 mSv. Cependant, eu égard à la composition par âge de la population, l'équivalent de dose efficace collectif risque de donner une évaluation excessive du détriment. Ceci vaut particulièrement pour les pays où c'est la population âgée qui reçoit la plus grande part des irradiations médicales.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

164. L'équivalent de dose efficace collectif pour l'ensemble du monde se situerait entre 2 et 5 x 10^6 homme Sv. Cet équivalent serait imputable pour 90 à 95 % aux procédures diagnostiques aux rayons X. La radiographie dentaire, la médecine nucléaire et la radiothérapie (ne tenant pas compte des doses cibles) sont à elles toutes responsables de 5 à 10 % seulement de la dose collective. Dans les pays développés, la contribution à l'équivalent de dose efficace collectif est d'environ 0,001 homme Sv par examen.

165. Il existe de nombreux moyens de diminuer la dose sans réduire les avantages des pratiques radiologiques. Dans les pays développés, on pourrait ramener l'équivalent de dose efficace par tête à la moitié de sa valeur actuelle. Dans les pays moins développés, on réduirait la dose par examen en préférant la radiographie à la radioscopie, en procédant à une collimation appropriée, en développant convenablement les plaques et en étalonnant et en entretenant le matériel mais on ne sait pas actuellement qu'elle serait la faisabilité et le coût de cette solution. Il est possible de réduire sensiblement la dose génétiquement significative en protégeant les gonades, solution facile et peu coûteuse. Ces mesures n'empêcheront peut-être pas l'équivalent de dose efficace collectif d'augmenter en raison de la généralisation des examens aux rayons X dans nombre de pays, généralisation qui, en fait, peut être souhaitable.

166. La fréquence et le nombre total des irradiations médicales devraient croître au cours des prochaines décennies en raison du vieillissement général et de l'accroissement de la population mondiale, ainsi que de la tendance à l'urbanisation dans les pays en développement. D'ici à l'an 2000, la dose collective augmentera probablement de 50 % et elle risque au moins de doubler d'ici à 2025.

5. Radioexpositions professionnelles 6/

167. Deux catégories de travailleurs sont radioexposées professionnellement : les travailleurs de l'industrie nucléaire et les membres des professions médicales, où les sources de rayonnement sont utilisées, ainsi que les travailleurs de plusieurs autres professions exposées à des niveaux de rayonnement naturel supérieurs (par exemple les équipages des aéronefs et les mineurs qui extraient d'autres minéraux que l'uranium). Le Comité a évalué en détail les radioexpositions professionnelles dans son rapport de 1982. Des estimations à jour de ces radioexpositions dans les activités du cycle du combustible nucléaire (doses annuelles moyennes de 3 à 8 mSv par utilisation du réacteur et une dose collective de 12 homme Sv pour chaque GW/an d'énergie électrique produite pour tous les travaux effectués dans le cadre du cycle du combustible nucléaire, voir tableau 6) ainsi que dans le secteur médical (doses annuelles moyennes de 0,3 à 3 mSv et une dose collective d'environ 1 homme Sv par million d'habitants, voir également par. 166; dans les pays développés une dose professionnelle moyenne d'environ 1 microsievert par examen) sont indiquées, de même que les radioexpositions du public, dans les annexes correspondant à ces questions.

168. La radioexposition des travailleurs sous rayonnement fait l'objet d'une surveillance radiologique obligatoire et détaillée dans tous les pays et, dans la plupart des cas, les doses ne correspondent qu'à une faible fraction des limites fixées, notamment en raison de l'importance actuellement accordée à l'optimisation de la radioprotection. On estime que l'engagement d'équivalent de dose efficace collectif par unité d'électricité produite pour les travailleurs de toutes les installations du cycle du combustible nucléaire n'a guère varié par rapport aux

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

estimations antérieures du Comité mais cette stabilité n'est possible que si les réductions des expositions compensent l'accroissement du nombre des travailleurs dans cette industrie en expansion.

169. L'exposition professionnelle dans le secteur médical s'effectue notamment dans le cadre des procédures (aux rayons X), de la radiographie dentaire, de la médecine nucléaire et de la radiothérapie. L'équivalent de dose efficace collectif moyen résultant de la radioexposition due à ces pratiques est chaque année d'environ 1 homme Sv pour 10^6 habitants. En dépit de l'accroissement des applications médicales des rayonnements dans la plupart des pays, les données limitées dont on dispose indiquent que les doses d'exposition professionnelle tant individuelles que collectives diminuent de 10 à 20 % tous les 10 ans. Dans les pays développés, l'exposition professionnelle moyenne est d'environ 1 microsievert par examen.

6. Expositions diverses

170. Le Comité procède à une évaluation des expositions aux sources diverses de rayonnement pour autant que des informations ou des développements nouveaux le nécessitent. La dernière évaluation, dans le rapport de 1982, porte sur divers appareils de consommation contenant des matières radioactives ainsi que sur du matériel électronique et électrique émetteur de rayons X. Généralement, les expositions individuelles dues à ces sources diverses sont très faibles. Le Comité a estimé que cette évaluation était encore valable et qu'aucune évaluation nouvelle n'était nécessaire.

7. Accidents

171. En raison de l'importance de l'industrie nucléaire dans certains pays et du grand nombre de sources de rayonnement utilisées dans l'industrie et en médecine, les accidents sont inévitables. Les principaux types d'accidents survenus sont : les accidents de criticité et autres accidents industriels exposant une seule personne ou quelques-unes; les accidents de transport y compris les accidents survenant à des satellites, des aéronefs et des sous-marins; les pertes ou les vols de sources de rayonnement et les accidents de réacteur.

172. Trois accidents de réacteur ont entraîné des expositions mesurables du public : Windscale en 1957, Three Mile Island en 1979 et Tchernobyl en 1986. L'accident du réacteur nucléaire de Tchernobyl a constitué un événement grave que le Comité analyse en détail dans deux annexes (annexe D "Expositions dues à l'accident de Tchernobyl" et annexe G "Effets précoces de l'irradiation à fortes doses chez l'homme").

173. Six accidents en tout sont survenus depuis 1982, dernière année au cours de laquelle le Comité a examiné cette question. Ce sont les suivants :

1983 : Constituyentes (Argentine). Un accident dû à une excursion critique de puissance s'est produit au cours d'un changement de configuration du coeur d'un réacteur causant la mort de l'opérateur qui se trouvait à trois ou quatre mètres seulement. On estime que la victime a reçu une dose de 5 à 20 Gy due aux rayons gamma et de 14 à 17 Gy due à des neutrons.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

1983 : Ciudad Juarez (Mexique). Une source épuisée au cobalt-60 qui avait échappé aux mesures de stockage prévues a été jointe par erreur à un lot de vieux métaux, contaminant le camion servant au transport, les bas-côtés de la route ainsi que l'acier produit à partir de ces vieux métaux. Trois cents à 500 personnes ont été exposées dont 10 à des doses de 1 à 3 Gy. Il n'y a pas eu de victime.

1984 : Mohammedia (Maroc). Une source à l'iridium-192 utilisée pour radiographier les soudures dans un chantier de construction s'est détachée du dispositif qui devait la remettre dans son conteneur blindé. Elle est tombée à terre et a été ramassée par un passant qui l'a emportée chez lui. Une famille entière de 8 personnes est morte de surexposition au rayonnement, à des doses de 8 à 25 Gy.

1986 : Texas (Etats-Unis). Un accident dans l'accélérateur linéaire a causé deux morts par surexposition.

1986 : Tchernobyl (Union soviétique). Lors de l'accident survenu dans la centrale nucléaire, deux membres du personnel d'exploitation ont été tués immédiatement par l'explosion. Environ 145 pompiers et membres des équipes de secours ont été victimes du syndrome aigu d'irradiation et 28 d'entre eux sont morts dans les trois mois qui ont suivi l'accident. Il y a eu 30 morts en tout; un travailleur est décédé des suites de blessures causées par des machines, un autre de ses brûlures. Les habitants de la région, dont aucun n'a subi d'exposition élevée, ont été évacués. La large dispersion des matières rejetées a créé des expositions faibles, essentiellement pour les populations de l'ouest de l'Union soviétique et d'autres pays d'Europe.

1987 : Gioania (Brésil). Une source au caesium-137 a été démontée dans une zone résidentielle, contaminant environ 240 personnes. Cinquante-quatre d'entre elles ont été hospitalisées et quatre sont morts.

8. L'accident de Tchernobyl 7/

174. A la suite de l'accident survenu le 26 avril 1986 au réacteur nucléaire de Tchernobyl, en Union soviétique, la région avoisinante a été amplement contaminée et des matières radioactives ont été largement dispersées et se sont déposées dans des pays d'Europe et dans tout l'hémisphère nord. Les pays n'avaient pas prévu qu'un accident de ce type puisse affecter à ce point une région aussi vaste. Une surveillance radiologique intensive visant à évaluer les niveaux de rayonnement a été déclenchée.

175. Peu après que les rejets provenant du réacteur aient été contenus, il est apparu que les incidences radiologiques de l'accident, du point de vue du risque individuel, étaient négligeables en dehors d'une région peu étendue de l'Union soviétique soit parce que les niveaux de contamination étaient généralement bas, soit parce que des mesures portant sur des aliments particulièrement contaminés ont empêché les expositions élevées.

176. L'accident du réacteur de Tchernobyl est survenu pendant un essai technique à faible puissance alors que les systèmes de sûreté avaient été débranchés. Les instabilités non maîtrisables qui se sont produites ont causé des explosions et un incendie qui ont endommagé le réacteur et permis à des gaz et particules radioactives de s'échapper dans l'environnement. Dix jours après l'accident, l'incendie avait pu être éteint et le coeur du réacteur scellé.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

177. Trois mois après l'accident, le bilan des victimes était de 30 morts parmi le personnel chargé d'exploiter le réacteur et les pompiers. Deux d'entre eux sont morts sur-le-champ, les 28 autres des suites de blessures causées par les radiations. Les doses de rayonnement aux membres de la population locale ont été bien inférieures aux niveaux pouvant causer des effets immédiats. Les habitants de la région ont été évacués dans un rayon de 30 kilomètres. Toute activité agricole a cessé et un vaste effort de décontamination a été entrepris.

178. Les premières matières radioactives rejetées ont été entraînées par les vents vers le nord. Ultérieurement, les rejets se sont dispersés également vers l'ouest et le sud-ouest ainsi que dans d'autres directions. Ce sont essentiellement les pluies, sporadiques à cette époque sur l'Europe, qui ont déterminé les retombées au sol. Ces retombées et par conséquent le transfert des radionucléides aux aliments et l'irradiation des individus se sont faits très inégalement ce qui a nécessité l'adoption d'une approche plus régionale pour calculer les doses.

179. Les mesures faites depuis l'accident ont montré que les principaux radionucléides responsables des doses étaient l'iode-131, le caesium-134 et le caesium-137 par irradiation externe des matières retombées et ingestion d'aliments contaminés. Dans son évaluation de la dose, le Comité a largement tenu compte de ces radionucléides et de ces voies critiques.

180. On a disposé d'informations détaillées pour calculer les doses de radiation pour la première année en Union soviétique et dans chaque pays d'Europe. Pour étendre ces résultats et pour établir des projections sur les doses qui seront produites par ces retombées, des régions plus vastes ont été évaluées. Le passage d'un hémisphère à l'autre des matières rejetées dans la troposphère étant négligeable, les pays de l'hémisphère sud n'auraient pu être touchés que par l'intermédiaire des importations de denrées alimentaires; on a tenu compte de cette possibilité en examinant l'ensemble de la production alimentaire de même que la consommation dans les pays de l'hémisphère nord.

181. Les valeurs qui ont servi au calcul tiennent entièrement compte des mesures effectuées pendant l'année qui a suivi l'accident. Pour la suite, il est nécessaire d'établir des prévisions afin d'estimer les contributions de dose ultérieures, dues essentiellement au caesium-137. Les prévisions reposent sur l'expérience acquise à la suite d'études antérieures sur les retombées radioactives des essais d'armes nucléaires dans l'atmosphère.

182. Les résultats des calculs de l'engagement de l'équivalent de dose efficace pour la première année dans 34 pays sont indiqués à la figure 1. Les valeurs les plus élevées ont été relevées pour la Bulgarie, l'Autriche, la Grèce et la Roumanie, puis pour d'autres pays d'Europe du Nord, d'Europe de l'Est et d'Europe du Sud-Est. Les pays européens situés plus à l'ouest et les pays d'Asie, d'Afrique du Nord, d'Amérique du Nord et d'Amérique centrale ont été moins touchés, ce qui est conforme au schéma des retombées.

183. Les engagements de dose dus à l'accident s'étaleront sur plusieurs années, en raison surtout de la persistence des expositions au caesium-137. En moyenne, 30 % environ des engagements de dose efficace ainsi que des engagements de dose efficace collectifs ont été reçus dans l'année qui a suivi l'accident. Les engagements de dose, sans limite de temps, dans des régions plus vastes, sont illustrés à la figure 2.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

184. Le principal résultat de l'évaluation de dose est l'engagement de l'équivalent de dose efficace collectif, estimé à environ 600 000 hommes Sv. Quarante pour cent de cet engagement sera reçu en Union soviétique et 57 % en Europe. Les 3 % restants le seront par d'autres pays de l'hémisphère nord.

185. Pour faciliter la comparaison avec la figure 1, l'équivalent de dose efficace pour une année provenant du rayonnement naturel est de 2,4 mSv. Aux fins de la comparaison avec la figure 2, il convient de noter que le plus gros de l'engagement de dose a été reçu dans les 30 années qui ont suivi l'accident. L'équivalent de dose efficace dû au rayonnement naturel sur une période de 30 années est d'environ 70 mSv. En utilisant ces comparaisons, il ne faut pas oublier que les doses constituent des moyennes des doses provenant de Tchernobyl et du rayonnement naturel s'appliquent à de vastes zones géographiques au sein desquelles il existe des variations locales.

B. Effets des rayonnements

1. Dommage héréditaire 8/

186. En dépit des progrès considérables qui ont été réalisés ces dernières années dans la compréhension du phénomène de la mutation, il n'y a pas eu, entre le rapport de 1986 et le présent rapport, de modification importante des principes de formulation des estimations du risque qui justifie de réviser les estimations des troubles mendéliens et chromosomiques d'origine naturelle ou radioinduits établies par la méthode de la dose doublante. On s'est toutefois efforcé de quantifier par cette méthode les risques d'induction de maladies récessives. De nouvelles données sur la prévalence des anomalies congénitales ainsi que d'autres troubles d'étiologie complexe (examinées en 1986) soulèvent un certain nombre de questions : est-il possible d'utiliser en toute sécurité la méthode de la dose doublante de 1 Gy pour étudier les troubles d'étiologie complexe? Quelle est la valeur du facteur de mutation pour ces troubles? Est-il opportun d'établir des estimations au sujet de ces troubles alors que l'on ne dispose toujours pas de données d'expérience ou de données statistiques sur l'être humain quant aux mécanismes qui régissent le maintien de ces troubles dans une population et aux effets que les rayonnements peuvent avoir sur eux? En attendant de disposer de nouvelles données, le Comité a préféré se déclarer pour l'instant incapable d'établir des estimations de risque véritablement fondées au sujet de ces troubles. Cependant, même en posant les hypothèses les plus extrêmes, comme celle par exemple d'un facteur de mutation de 100 %, le risque de dommages héréditaires pour les descendants de la première génération ne semblent pas plus élevés que celui que les estimations actuelles indiquent pour le cancer. La situation restant inchangée en 1988 et, par conséquent, les estimations du risque d'effets héréditaires que le Comité propose pour l'instant sont celles qui sont présentées au tableau 7.

187. En ce qui concerne les estimations les plus récentes établies selon les méthodes directes, le Comité a estimé que 10 à 20 par 10^{-2} Gy pour un million de naissances vivantes ont des maladies génétiques causées par des mutations dominantes induites. Le Comité a estimé également que les mutations récessives seraient responsables d'environ 10 cas supplémentaires d'anomalie génétique chez les enfants des 10 premières générations, par million de naissances vivantes par 10^{-2} Gy. Enfin, en ce qui concerne les translocations réciproques symétriques, le Comité a estimé qu'il existait un risque de 1 à 15 cas de malformations congénitales par million de naissances vivantes par 10^{-2} Gy chez les enfants de pères irradiés (0 à 5 cas dans le cas d'une irradiation de la mère). Là encore, le Comité a estimé que les chiffres étaient toujours valables (voir tableau 2).

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

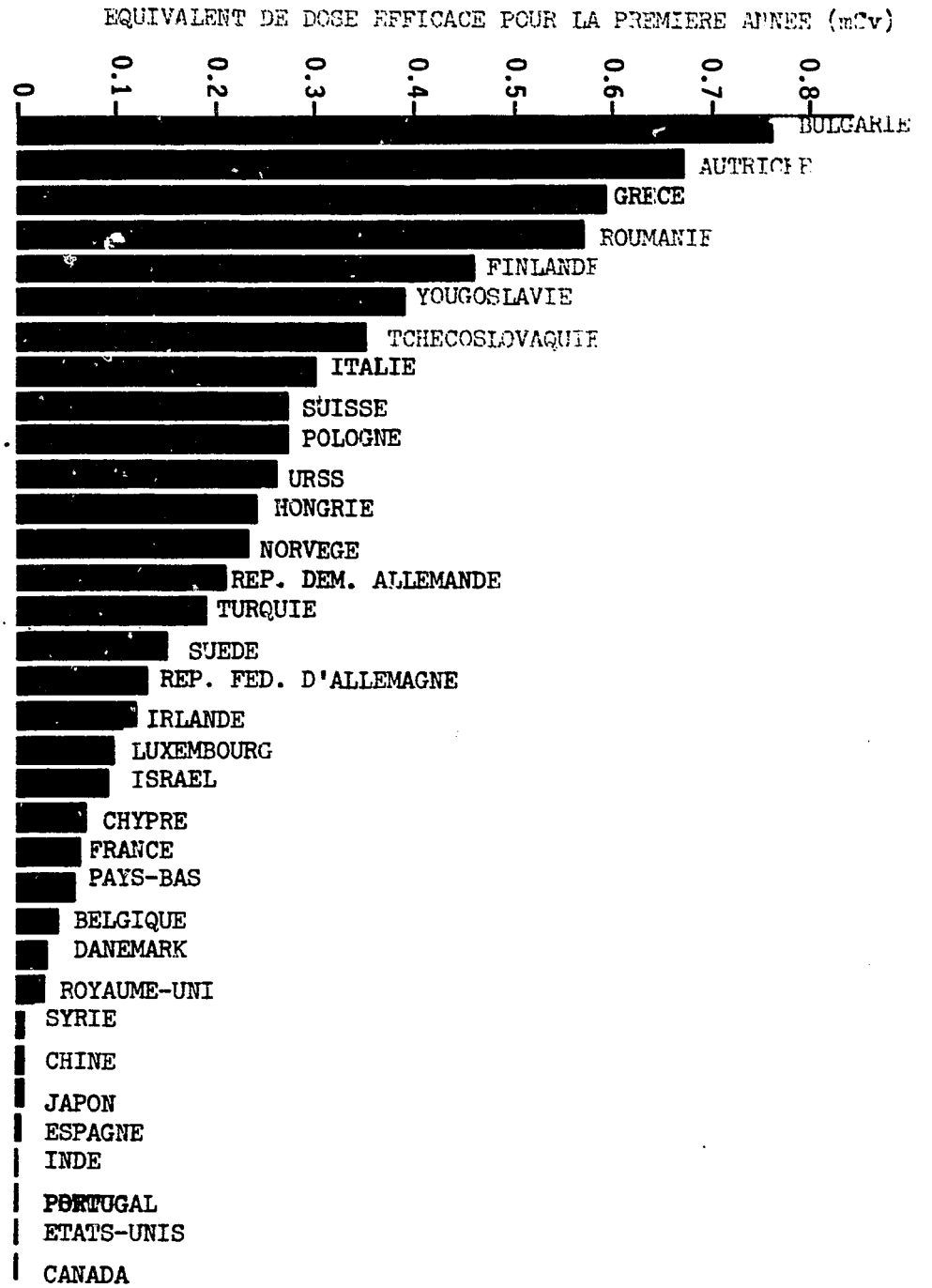


Figure 1. Moyenne par pays pour la première année de l'engagement de dose efficace provenant de l'accident de Tchernobyl

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

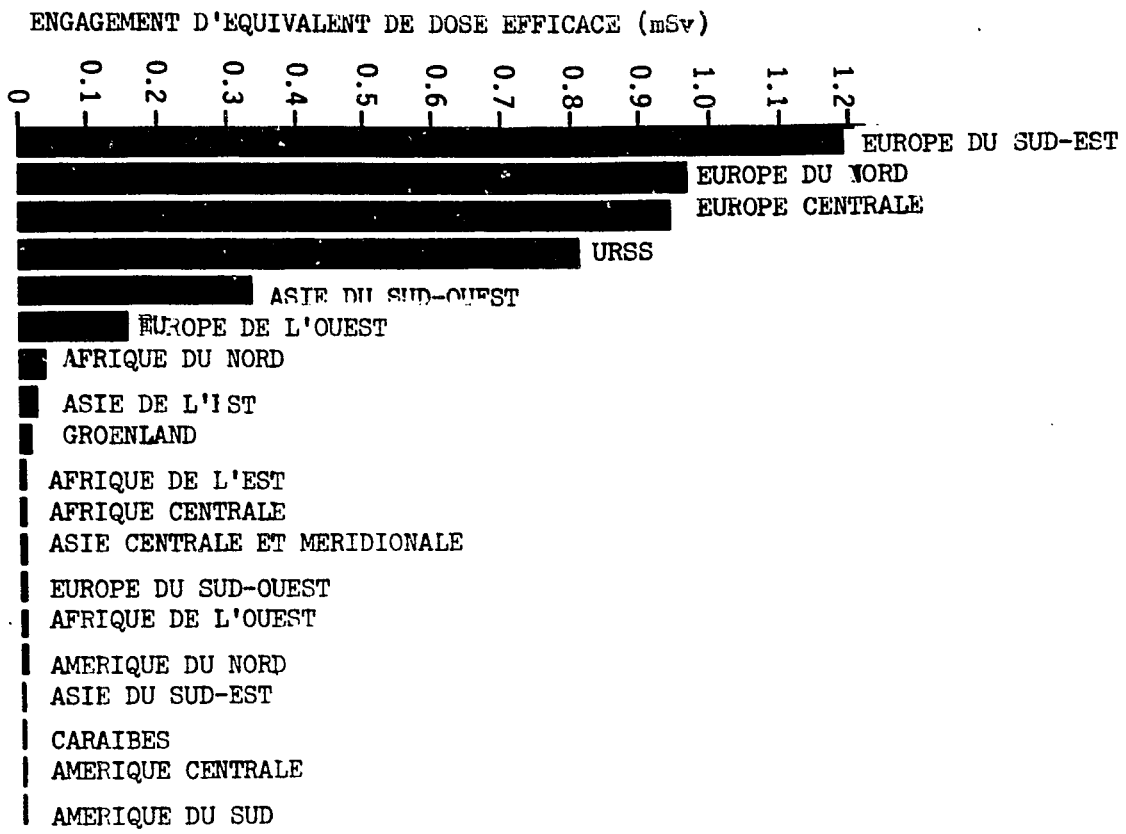


Figure 2. Moyenne régionale de l'engagement d'équivalent de dose efficace provenant de l'accident de Tchernobyl

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

188. Bien qu'il ne l'ait pas précisé explicitement avant 1982, le Comité a toujours été conscient de ce qu'en indiquant simplement les variations du nombre de troubles génétiques graves, il ne rendait pas compte de la totalité du dommage. En l'absence d'indicateurs objectifs et quantifiables de la gravité de ces troubles, il est difficile d'évaluer pleinement les conséquences que ces risques de maladies dus aux rayonnements font peser sur l'individu, la famille ou la société. Le Comité a donc commencé, à partir de son rapport de 1982, à examiner systématiquement les données ayant une incidence sur ces problèmes afin de se faire une meilleure idée du véritable détriment lié aux estimations du risque héréditaire. Bien qu'il soit convaincu qu'une méthode de cette nature permettra d'évaluer de manière beaucoup plus affinée les incidences des troubles radio-induits, le Comité est d'avis que celle-ci n'est pas encore suffisamment au point pour être utilisée immédiatement.

189. Le Comité tient à souligner qu'il n'existe pas encore de données directes sur les radio-inductions de maladies héréditaires chez l'être humain. Tant qu'il en sera ainsi, il n'y aura pas d'autre solution que de continuer à utiliser les données recueillies chez d'autres espèces mammifères, convenablement corrigées compte tenu des connaissances en génétique humaine, pour estimer le risque de maladie héréditaire chez l'homme.

190. Toutes les estimations numériques des risques génétiques examinées jusqu'à présent ont été établies sur la base des doses génétiquement significatives, autrement dit dans l'hypothèse où les doses sont reçues avant ou pendant la période de reproduction. Il est évident que dans le cas de l'exposition d'une population tout entière, les doses génétiquement significatives sont nettement moins fortes que les doses totales reçues pendant toute la durée de vie : les dommages subis par les cellules germinatives des invidus ayant dépassé la période de reproduction ou qui ne se procréent pas pour toute autre raison ne posent pas de risques génétiques. Si on retient un âge à la reproduction de 30 ans et une espérance de vie moyenne à la naissance de 75 ans, la dose reçue avant l'âge de 30 ans équivaut à 40 % de la dose totale.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

Tableau 7

Estimations du risque de maladie génétique grave par million de naissances vivantes dans une population exposée à un équivalent de dose génétiquement significative de 1 Sv par génération avec faible débit de dose et irradiation à faible dose, calculées selon la méthode de la dose doublante

(Ces estimations sont fondées sur un équivalent de dose doublante de 1 Sv)

Classification des maladies	Incidence actuelle par million de naissances vivantes	Effet de 1 Sv par génération		
		Première génération	Deuxième génération	Equilibre
Maladies dominantes autosomiques et liées à l'X	10 000	1 500	1 300	10 000
Maladies récessives autosomiques	2 500	5	5	1 500
Troubles chromosomiques				
Dus à des anomalies structurelles	400	240	96	400
Dus à des anomalies numériques	3 400	Probablement très faible		
Anomalies congénitales	60 000)			
	)		Non évalué	
Autres maladies multifactorielles	600 000)			
Maladies dominantes à action précoce)				
	) Inconnue		Non évalué	
Tumeurs congénitales	)			
Total des estimations de risque		1 700	1 400	12 000

191. Pour obtenir les coefficients de risque génétique relatifs à une population, il convient donc de multiplier les estimations du risque génétique dont il a été question plus haut par 0,40. Les calculs ci-après reposent sur les estimations de risque les plus récentes présentées au tableau 7 de l'annexe E, "Les risques génétiques", et donnent les coefficients de risque par sievert :

a) Coefficient de risque sur la base d'une dose aux gonades dans la fraction de la population en âge de procréer (extrait de l'annexe E, tableau 7); pour les dommages quantifiables uniquement, pour toutes les générations : $12\ 000/10^6$ soit 1,2 %

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

b) Coefficient de risque pour l'ensemble de la population et non pas seulement pour la fraction en âge de procréer, pour toutes les générations (0,4 x 1,2 %) : 0,5 %

c) Coefficient de risque dans les mêmes conditions qu'en a) mais pour les deux premières générations seulement : $3\ 200/10^6$ soit 0,3 %

d) Coefficient de risque pour l'ensemble de la population, pour les deux premières générations (0,4 x 0,3 %) : 0,1 %

2. Radiocancérogénèse chez l'homme 9/

192. Le Comité a examiné les derniers résultats obtenus dans le domaine du cancer radio-induit en ayant à l'esprit :

a) Les nouveaux progrès extrêmement importants dans la connaissance des mécanismes moléculaires de l'induction des cancers;

b) L'analyse reproduite à l'annexe B du rapport du Comité de 1986, "Relations dose-effet en radiocancérogénèse";

c) De nombreuses données additionnelles sur les principales études épidémiologiques telles que celles qui ont été effectuées sur les survivants d'Hiroshima et de Nagasaki;

d) Un système de dosimétrie révisé applicable aux survivants d'Hiroshima et de Nagasaki, qui permet de mieux analyser cette importante série épidémiologique.

193. Plusieurs facteurs déterminent la probabilité d'apparition d'un cancer chez un être humain exposé au rayonnement. Certains de ces facteurs dépendent du sujet, autrement dit de la personne recevant la dose; il s'agit de ses caractéristiques génétiques, de son âge, son sexe, son état de santé; d'autres sont liés aux conditions d'irradiation, par exemple à la dose délivrée, à la durée pendant laquelle elle a été reçue, à la qualité du rayonnement; il existe enfin d'autres facteurs qui peuvent se conjuguer à l'irradiation en modifiant la fragilité du sujet, par exemple ses habitudes de vie ou son exposition à d'autres agents toxiques. Il n'existe donc pas de méthode unique simple pour évaluer les effets et le Comité a donc retenu plusieurs approches.

194. L'une de ces approches consiste à étudier les effets de différentes expositions ou de différentes caractéristiques du sujet sur les modèles biologiques de cancérogénèse. Cette approche permet d'étudier certains aspects du risque, par exemple la variation du risque avec le temps ou avec l'âge du sujet radioexposé. Une autre démarche vise à analyser les rapports entre la dose-réponse et le risque-prévision. Une troisième méthode consiste à effectuer une étude de régression directe des données épidémiologiques, particulièrement en appliquant les techniques modernes de régression multiple qui conviennent particulièrement à des phénomènes complexes comme ceux-ci.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

195. Les séries épidémiologiques qui contiennent le plus d'informations sont celles qui ont été réalisées auprès des groupes suivants : a) des personnes chroniquement exposées à des doses élevées ou intermédiaires de rayonnement sans que les dangers de ces expositions soient connus; b) des groupes importants qui ont été chroniquement exposés à de faibles doses pour des raisons professionnelles, médicales ou liées à l'environnement; c) des personnes qui ont reçu des doses élevées à des fins thérapeutiques pendant de courtes périodes et seulement dans certaines parties de leur organisme; d) des individus qui ont été et sont encore exposés à des doses faibles de rayonnement à des fins de diagnostic médical; e) des groupes particuliers qui ont subi une irradiation externe à la suite des bombardements atomiques d'Hiroshima et de Nagasaki ou interne en raison des retombées dues aux essais d'armes nucléaires; f) des individus qui ont reçu des doses assez fortes à la suite d'accidents divers.

196. L'examen épidémiologiques des catégories énumérées ci-dessus a nécessité l'emploi de deux méthodes : a) les études de groupes qui consistent à examiner après coup les cas de cancers chez les individus exposés et à les comparer avec ceux d'un groupe de référence non exposé et convenablement choisi; et b) les études de contrôle de cas qui consistent à comparer des individus d'une population exposée à des individus d'une population de référence et à les suivre pendant une période à venir. La deuxième méthode présente de nets avantages mais ne peut évidemment être appliquée qu'à des expériences particulières.

197. La plupart des études rétrospectives que le Comité a examinées dans son rapport de 1977 se poursuivent encore et de nouveaux résultats ont été communiqués. Dans plusieurs séries, par exemple les séries de données sur le cancer du sein radio-induit, les conclusions précédentes ont été affinées et on a précisé les schémas dose-réponse en combinant les résultats de plusieurs enquêtes. Dans d'autres séries, comme celle sur l'irradiation pelvienne et ses rapports avec les tumeurs du col de l'utérus, les résultats précédents ont été remis en question, au moins partiellement. Enfin, par exemple dans les études de groupes soumis à une radioexposition professionnelle, un examen et une réinterprétation plus attentifs ont conduit à critiquer les résultats antérieurs qui avaient été déformés de diverses façons au cours de l'enquête et de la communication des résultats. Parmi le problèmes qui se sont posés on peut citer, entre autres, les imprécisions de la dosimétrie, le choix des groupes de référence et les difficultés potentielles ou réelles de la détection des tumeurs.

198. Toutes les études prospectives importantes qui étaient en cours en 1977 se poursuivent encore. On dispose au sujet des survivants d'Hiroshima et de Nagasaki de trois nouvelles séries de chiffres de mortalité ainsi que de données supplémentaires relatives à l'incidence qui ont permis d'améliorer les estimations de la relation dose-réponse pour certains types de tumeurs et d'ajouter d'autres cancers (cancer du colon et des ovaires, myélome multiple) à la liste des tumeurs dont on savait déjà qu'elles étaient radio-induites. Un certain nombre de renseignements sont venus compléter les études sur des personnes exposées à l'installation nucléaire de Hanford au cours des retombées dans les Iles Marshall ainsi que des patients ayant subi une radioexposition en raison par exemple de spondylite ankylosante, de mastite, de pneumothorax ou de maladies liées à la thyroïde. Les risques absolus et relatifs pour ces groupes ont continué de croître (sauf peut-être chez les sujets atteints de spondylite ankylosante et chez les membres les plus jeunes à l'époque des groupes ayant subi les bombardements d'Hiroshima et de Nagasaki). Il est évident que toutes ces études devront être poursuivies pendant toute la vie des personnes radioexposées si l'on veut obtenir

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

des renseignements complets sur les rapports dose-réponse et temps-réponse en ce qui concerne l'induction des cancers. Afin de pouvoir généralier les renseignements intéressants, il est aussi indispensable de connaître les ressemblances entre ces groupes et d'autres populations, de savoir comment l'exposition aux risques non liés au rayonnement a pu évoluer et avec quelles conséquences, et de déterminer les rapports, dans la population en général, entre le risque créé par une dose donnée de rayonnement et le risque général d'induction du cancer. L'une des tâches les plus difficiles, dans cette estimation du risque, consiste toujours à déterminer la forme de la relation dose-réponse, dont il a été abondamment question dans le rapport de 1986. Bien qu'il soit possible, pour analyser le risque, d'utiliser un certain nombre de modèles, chacun d'eux représente tout au plus une approximation par rapport à la relation réelle dose-réponse et comporte des limites ou des pièges potentiels.

199. L'analyse de la mortalité des survivants d'Hiroshima et de Nagasaki constitue la principale source de renseignements sur le risque d'induction du cancer lié au rayonnement. Une réévaluation récente des doses absorbées par les tissus dans ce groupe a montré clairement que les doses de neutrons avaient été sensiblement inférieures à ce que l'on avait pensé jusqu'alors, de sorte que l'on estime maintenant que les chiffres correspondants, particulièrement ceux qui se rapportent aux survivants d'Hiroshima, renseignent beaucoup moins qu'on ne l'avait cru sur les effets des neutrons. Il est donc nécessaire de réexaminer attentivement le vaste ensemble des données de l'expérience ainsi que les quelques preuves épidémiologiques existantes sur l'efficacité biologique relative (EBR) des neutrons pour établir une estimation du risque lié à ce type de rayonnement.

200. Une nouvelle étude internationale des patients qui ont survécu au traitement du carcinome du cervix a fourni des données additionnelles sur l'apparition de deuxièmes cancers dans certains tissus.

201. Aucune des grandes études épidémiologiques n'a encore donné de résultats en ce qui concerne les cas de cancer pendant toute la durée de vie des sujets étudiés. Par conséquent, afin d'établir des prévisions du risque global de cancer correspondant à une population exposée, il est nécessaire de recourir à des modèles permettant d'extrapoler dans le temps les données concernant une brève période de la vie d'individus exposés. Deux modèles de ce type ont été particulièrement étudiés. Il s'agit a) du modèle additif qui pose en hypothèse que le risque additionnel de cancer apparaît après une période de latence puis reste constant; b) du modèle multiplicatif selon lequel la répartition dans le temps du risque additionnel est similaire à celle des cancers naturels, c'est-à-dire que le risque additionnel de cancer s'obtient en appliquant un facteur constant à l'incidence des cancers naturels dans la population, laquelle est fonction de l'âge. On dispose maintenant de données qui permettront peut-être de mieux comprendre les possibilités d'application de ces deux modèles et des conclusions d'études récentes faites au Japon montrent que le modèle relatif est probablement celui qui convient le mieux, au moins pour certains des types de cancers les plus courants. On devrait disposer prochainement de conclusion plus solides.

202. On estime généralement que le cancer apparaît en plusieurs étapes : pour que des cellules deviennent cancéreuses, il faut qu'elles soient le siège d'une série d'événements dont le rythme se reflète, pense-t-on, dans la façon dont les cancers se manifestent dans la population avec le temps. L'application de ce principe à l'analyse des diverses séries épidémiologiques fait apparaître un certain nombre de contradictions et il n'est donc pas possible pour l'instant de déterminer les stades

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

de cancérogénèse qui sont affectés par les rayonnements et de déterminer si ces effets s'exercent à plus d'un stade ou si le modèle comprenant plusieurs stades permet d'expliquer le processus réel. Il est possible que chacune de ces explications recèle une certaine vérité. Il se peut même que les événements supposés au niveau cellulaire ou subcellulaire ne puissent pas être facilement reliés aux résultats cliniques sur la cancérogénèse radioinduite.

203. Un petit nombre de gènes, appelés oncogènes, ont été accusés d'être responsables de la transformation des cellules normales en cellules cancéreuses. On ne connaît pas précisément les mécanismes selon lesquels ces oncogènes pourraient être rendus actifs par les rayonnements mais, jusqu'ici, les résultats recueillis n'ont pas fait apparaître de modifications particulières qui laisseraient supposer que les rayonnements ont un rôle spécial dans l'induction des cancers ou aideraient à différencier au niveau génétique les tumeurs radioinduites des tumeurs causées par d'autres agents cancérigènes.

204. Le Comité a examiné en détail les renseignements disponibles sur la vulnérabilité au cancer radioinduit en fonction du temps et a considéré séparément les résultats des observations sur les enfants et ceux de l'observation sur les adultes. Dans le cas des enfants, il ressort de ces résultats que la thyroïde, le tissu osseux, la moelle osseuse et le sein réagissent sans aucun doute à l'action cancérigène des rayonnements. La majorité des enfants atteints de cancers (de tumeurs primaires localisées), chez lesquels la radiothérapie avait réussi et qui ont ensuite présenté des tumeurs secondaires, sont ceux dont la tumeur primaire était due en grande partie à des facteurs héréditaires. De toute évidence, ces enfants sont plus exposés au cancer que les enfants normaux. En général, certaines parties du corps sont plus exposées et les résultats des études génétiques montrent que les régions des gènes jouent un rôle, tant en ce qui concerne le tissu de la tumeur primaire (par exemple rétinoblastome) que celui de la tumeur secondaire (par exemple sarcome des os). On sait aussi que les sujets atteints de formes héréditaires de rétinoblastome ont tendance à présenter des ostéosarcomes éloignés du champ irradié ou en l'absence d'irradiation. Le risque spontané d'apparition de tumeurs secondaires chez les sujets atteints de rétinoblastome est dû à l'apparition somatique d'homozygosité chez les enfants qui n'héritent que d'un seul exemplaire de la mutation correspondante, mais on ne sait pas encore si c'est aussi ce mécanisme qui permet au rayonnement de produire des tumeurs secondaires. Il semblerait dans le cas de tumeurs secondaires faisant suite à un rétinoblastome primaire qu'il soit possible d'appliquer un modèle de prévision multiplicatif, comme on peut le faire pour la plupart des tumeurs chez l'adulte.

205. Il est possible de formuler un certain nombre de principes généraux au sujet de la radioinduction des tumeurs. Les rayonnements sont manifestement cancérigènes si la dose est suffisammemt élevée mais il n'existe pas de type particulier de cancer dû au rayonnement. La leucémie (sauf la leucémie lymphatique chronique) est la forme la plus courante de cancer induit mais les rayonnements peuvent également induire des tumeurs au sein, à la thyroïde, aux poumons, à la moelle osseuse et dans certaines autres parties du corps. La fréquence d'induction par Gy est fonction du tissu. Certaines tumeurs telles que la leucémie lymphatique chronique, le carcinome cellulaire squameux du col de l'utérus et la maladie de Hodgkin ne sont par radioinduites. Les tumeurs induites surviennent quelque temps après l'exposition, la période de latence étant généralement de deux à cinq ans pour la leucémie et de 10 ans ou plus pour les autres tumeurs. L'âge est le facteur le plus général lié au sujet mais d'autres facteurs, notamment génétiques, interviennent également. Ces aspects sont décrits à l'annexe F.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

206. En général, les résultats des études sur les cancéreux sont analogues à ceux des études portant sur d'autres groupes exposés en ce qui concerne la structure du risque après irradiation. Néanmoins, dans certains cas, le risque chez les cancéreux semble différent de ce qu'il est dans l'ensemble de la population. Cela peut être dû à ce que les probabilités de cancer ne sont pas les mêmes pour tous ou aussi être imputé à des différences d'exposition aux facteurs de risque liés à l'environnement, comme le tabagisme. Les cancers supplémentaires frappent aussi bien les sujets irradiés que les sujets non irradiés, ce qui rend difficile d'évaluer les risques radioinduits et indiquerait que les chiffres obtenus ne peuvent être appliqués.

207. La question de la relation dose-réponse a été examinée en détail à l'annexe B du rapport de 1986. Le Comité était alors parvenu à la conclusion qu'il existait un schéma dose-réponse caractéristique pour chaque type de tumeur et que, pour la majorité d'entre elles, il était encore difficile d'évaluer ce schéma de façon satisfaisante. Une conclusion générale avait néanmoins pu être tirée, à savoir que pour les irradiations à faible TLE, la plupart des relations dose-réponse pouvaient être représentées par une courbe concave ascendante atteignant un maximum puis redescendant tandis que l'accroissement de la dose se traduisait par un affaiblissement de la réponse. Cet affaiblissement et cette courbe descendante aux fortes doses semblent s'expliquer par la destruction des cellules créées par les rayonnements qui sont responsables de l'apparition des tumeurs.

208. En 1986, le Comité est parvenu à la conclusion que certaines tumeurs, telles que, par exemple, les carcinomes du sein et peut-être de la thyroïde, semblaient, lorsqu'elles étaient exposées à des irradiations à faible TLE, suivre un schéma linéaire de dose-réponse. Pour d'autres, un schéma linéaire ne pouvait être exclu statistiquement mais d'autres schémas (schéma quadratique linéaire ou quadratique) semblaient approximativement rendre compte tout aussi bien des résultats. Ces observations continuent d'être considérées comme valables bien que, selon des études effectuées récemment, des doses extrêmement fractionnées ne semblent pas aussi capables d'induire un cancer du sein qu'on ne le pensait précédemment en raison du schéma linéaire et du manque apparent d'effets du fractionnement des doses. Des études épidémiologiques effectuées récemment sur des patients auxquels avaient été administrées à des fins de diagnostic des doses d'iodures d'iode-131 semblent indiquer que les radiations à faible TLE et à faible débit de dose sont également beaucoup moins efficaces que les doses intermédiaires et élevées administrées à débit de dose élevé. Cela signifie probablement que la relation dose-réponse pour l'induction du cancer de la thyroïde est également de type non linéaire (concave ascendante), comme le Comité le pensait dans son rapport de 1986.

209. On sait que de nombreuses différences biologiques entre les êtres humains modifient leur résistance au cancer radioinduit et le Comité a examiné ces différences, connues sous le nom de facteurs liés au sujet. Les renseignemens dont on dispose indiquent généralement qu'il existe un rapport nul ou faible entre le sexe et la cancérogénèse radioinduite puisque la distribution par sexe des cancers radioinduits (thyroïde, sein, poumons, leucémie) est similaire dans la population irradiée et dans la population non irradiée. Les chiffres montrent par ailleurs que le risque de tumeur radioinduite diminue au fur et à mesure que l'âge augmente, les périodes de latence dépendant non pas tant de l'âge au moment de l'exposition que des tissus irradiés. L'âge moyen et la distribution par âge des cas chez les adultes exposés à des doses uniques sont en général analogues à ceux qui sont observés dans l'ensemble de la population. Les chiffres sur les effets du facteur génétique indiqueraient qu'une partie faible mais non négligeable de la population

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

est plus vulnérable au cancer et risque donc de résister moins bien au rayonnement ou autres agents cancérigènes. Pour améliorer les évaluations du risque, il conviendrait de mettre au point des moyens plus perfectionnés pour identifier les individus exposés.

210. Dans la conclusion de son étude, le Comité a fait un bilar analytique général des effets radiocancérigènes à partir des sources de renseignements les plus complètes dont il disposait. Un petit nombre seulement d'études épidémiologiques - celles effectuées sur les survivants des bombardements nucléaires et sur les patients exposés au cours du traitement de la spondylite ankylosante ou du cancer de l'utérus (leucémie seulement) - permettent d'établir une estimation du risque cancérigène du rayonnement pour une large gamme de tissus différents. Toutes ces études ont été effectuées sur de vastes échantillons de population exposés pendant de courtes périodes à des rayonnements X ou gamma et suivis ensuite pendant longtemps; néanmoins, chaque série de données présente ses caractéristiques propres. Le Comité a étudié les résultats qui, dans ces séries, se rapportent aux tumeurs de chaque type de tissus, et en tenant compte des estimations de risque établies à l'issue d'autres études à diverses époques. L'évaluation des estimations de risque effectuée par le Comité est examinée à la section C.2 du chapitre III.

3. Effets précoces de doses élevées de rayonnement chez l'homme 10/

211. Le Comité a fait le bilan des connaissances accumulées au sujet des effets qui surviennent chez l'homme, dans un délai de deux à trois mois après qu'il ait reçu des doses au corps entier uniformément réparties et dépassant environ 1 Gy de rayonnement X ou gamma. Ces chiffres se rapportent à trois grands groupes : accidentés, victimes de bombardements atomiques et personnes traitées par radiothérapie. D'importants renseignements sur cette question ont été recueillis récemment à l'occasion de l'accident nucléaire à la centrale de Tchernobyl au cours duquel une centraine de personnes ont été exposées à une irradiation externe et interne de 1 Gy ou plus. La délégation soviétique a établi spécialement à l'intention du Comité un rapport détaillé intitulé "Effets aigus des rayonnements sur les victimes de l'accident de la centrale nucléaire de Tchernobyl", qui est reproduit en appendice à l'annexe G.

212. Les premières réactions prodromiques dans les 48 heures qui suivent l'irradiation sont transmises par le système nerveux autonome et se manifestent au niveau gastro-intestinal et neuro-musculaire. L'incidence et les périodes de latence pour ces effets dépendent de la dose. C'est ainsi que la dose qui cause des vomissements chez 50 % des sujets exposés est d'environ 2 Gy, à laquelle correspond une période moyenne de latence d'environ trois heures.

213. Des doses supérieures à 50 Gy entraînent invariablement la mort dans les deux jours en raison des dommages cérébro-vasculaires (syndrome dit neurologique). Des doses uniformes au corps entier de 10 à 50 Gy entraînent l'apparition du syndrome gastro-intestinal, dont l'issue est généralement fatale, la plupart des décès survenant au cours de la deuxième semaine qui suit l'irradiation. Malgré les données recueillies sur les personnes tuées par les bombardements atomiques, on dispose de trop peu de renseignements pour évaluer précisément la relation entre la dose et la probabilité de mort due à ce syndrome. Le délai dans lequel la mort causée par ce syndrome survient dépend du temps que les muqueuses intestinales mettent à se reconstituer et il est aussi déterminé par des facteurs secondaires : infections, hémorragies, déperditions en liquides organiques, protéines, électrolytes.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

214. Des doses uniformes au corps entier comprises entre 1 et 10 Gy entraînent l'apparition du syndrome de la moelle osseuse, dont l'incidence et la gravité dépendent de la dose. L'endommagement initial de la moelle causé par de faibles doses diminue le nombre de globules blancs dans le sang et la quantité de lymphocytes constitue donc l'indice le plus sensible d'un dommage. Des doses de 1 à 2 Gy réduisent la quantité de lymphocytes de moitié par rapport à la normale dans les 48 heures qui suivent l'irradiation. On observe un accroissement initial du nombre des neutrophiles dans les premiers jours, puis une diminution en fonction de la dose. Dix jours après une irradiation de 2 à 5 Gy, le nombre de neutrophiles augmente une deuxième fois très brièvement mais si la moelle osseuse ne se reconstitue pas, ils finissent par diminuer. Il existe une corrélation entre la diminution du nombre des neutrophiles, l'apparition de la fièvre et la probabilité de survie. La diminution dans le temps du nombre des plaquettes est sensiblement similaire à celle des granulocytes, mais sans deuxième accroissement bref. La diminution du nombre des plaquettes dans le sang en dessous de 30 000 à 50 000 par microlitre est associée à des saignements. Les victimes d'exposition à des doses faiblement ou moyennement létales sont beaucoup plus exposées aux infections dues à des lésions du système hématopoïétique et immunitaire.

215. En plus des effets à l'ensemble du système, l'irradiation peut aussi endommager de nombreux autres tissus et organes ayant subi une exposition distincte. Les délais d'apparition et la gravité des symptômes cliniques résultants varient. Les syndromes décrits peuvent survenir éventuellement, en totalité ou en partie, selon les tissus irradiés, le niveau de dose, les modalités de l'irradiation et d'autres facteurs physiques et biologiques.

216. L'irradiation de la peau cause des lésions qui sont bien connues et très liées à la dose et à la zone irradiée, en ce sens qu'à des niveaux plus faibles, les surfaces irradiées doivent être plus grandes pour que le niveau de dommage soit le même. Les lésions de la peau comprennent des érythèmes, une pilosité anormale, la chute du système pileux, la desquamation et des dommages vasculaires et dermiques. La dose reçue par la couche basale de l'épiderme détermine le nombre de cellules détruites et, donc, le degré de desquamation.

217. Les lésions des muqueuses de la bouche et de la gorge sont constituées par des inflammations et des enflures, avec ulcération et nécrose lorsque les doses étaient élevées. Les lésions des muqueuses les plus graves sont observées à l'intérieur des joues, sur le palais mou et dans la région hypoglossale. On connaît bien aussi les effets aigus sur l'oeil, effets qui dépendent étroitement des structures irradiées ainsi que des doses reçues.

218. Lorsque le thorax est irradié, la première manifestation des radiolésions du poumon est la pneumonie qui apparaît au bout d'un à trois mois dans le cas de doses supérieures à 8 Gy. Le délai d'apparition de la pneumonie n'est pas nettement lié à la dose lorsque celle-ci varie entre 6 et 12 Gy. A Tchernobyl, certains patients ont connu des réactions pulmonaires précoces. Ces modifications étaient probablement d'origine multifactorielle.

219. Des doses aiguës inférieures ou égales à 4 Gy entraînent une stérilité temporaire chez certains individus de sexe masculin mais il faut une dose d'au moins 6 Gy pour rendre définitivement stérile la totalité des sujets irradiés de sexe masculin. Bien que certaines des formes qui différencient les spermatogonies réagissent rapidement et soient extrêmement radiosensibles, le nombre de spermatozoïdes ne commence à diminuer qu'au bout de six semaines. La stérilité

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

temporaire chez les femmes est induite par des doses de moins de 4 Gy, la stérilité permanente par des doses de 4 à 10 Gy. Les femmes plus âgées sont plus exposées, probablement parce que le nombre des follicules ovariens diminue avec l'âge.

220. Il est souvent utile de connaître la dose de rayonnement pouvant entraîner, en moyenne, 50 % de décès dans les 60 jours ($LD_{50/60}$). Cette notion de LD_{50} est largement utilisée dans les travaux expérimentaux mais il est douteux qu'elle puisse être appliquée en radiobiologie humaine, sauf à des fins statistiques. Les séries épidémiologiques permettant d'estimer cette dose à l'être humain concernent des personnes soignées par radiothérapie, des accidentés, ainsi que les victimes des bombardements atomiques au Japon, au cours de la seconde guerre mondiale. Les études les plus récentes sur la $LD_{50/60}$ portant sur les irradiations au Japon (après révision de la dose) ont donné des valeurs de l'ordre de 3 Gy. On estime que ces chiffres sont valables dans les conditions très particulières observées après les bombardements pour des victimes irradiées ne recevant pas de traitement médical ou un traitement seulement minime.

221. Certains groupes de personnes traitées par radiothérapie ont été utiles pour l'évaluation de la $LD_{50/60}$. Aucun des 20 enfants et adolescents atteints du sarcome d'Ewing et traités par une irradiation de 3 Gy au corps entier n'est mort dans l'année. La $LD_{50/60}$ dans les groupes d'adultes irradiés pour des cancers disséminés a été de 2,86 Gy dans une série et de 3,4 Gy dans une autre. Tous ces résultats indiquent que la $LD_{50/60}$ pour les cancéreux est probablement de l'ordre de 3 Gy tandis que pour les personnes en bonne santé bénéficiant de soins classiques après irradiation, il se peut qu'elle soit de 4 à 5 Gy.

222. Au cours de l'accident de Tchernobyl, selon les estimations, 43 personnes ont reçu des doses de 2 à 4 Gy et une en est morte. Sur les 21 personnes qui ont reçu des doses de 4,2 à 6,3 Gy, 7 sont mortes. Sur 20 patients ayant reçu des irradiations de 6 à 16 Gy, 19 sont morts. En raison des complications dont beaucoup de ces patients ont souffert au cours de l'accident, notamment sous la forme de lésions thermiques et cutanées, il est difficile d'établir, sur la base de ces données, la valeur de la $LD_{50/60}$.

223. Le Comité a conclu de l'étude et de l'examen de toutes ces données qu'il était impossible de fixer une valeur unique de la LD_{50} pour l'homme car cette valeur pouvait varier fortement en fonction de l'âge, de l'état de santé des sujets irradiés et des mesures prophylactiques ou thérapeutiques appliquées avant et après l'irradiation. Pour la planification de mesures d'urgence, il est important de savoir quelles valeurs de la LD_{50} s'appliquent et dans quelles situations. Le Comité souligne, néanmoins, que la LD_{50} a une valeur purement statistique et qu'elle ne peut absolument pas servir à prévoir les chances de survie d'un individu donné.

224. Les neutrons causent davantage de fortes lésions que les rayonnements X ou gamma, de 2 à 3 fois plus avec des doses uniques. On possède peu de données réelles sur les effets mortels des irradiations neutroniques subies par l'être humain, sauf celles qui ont été recueillies à la suite de quelques accidents isolés. Selon les avis actuels, la composante neutronique des doses reçues par les survivants des bombardements atomiques serait beaucoup plus faible qu'on ne le pensait précédemment et les données relatives à ces survivants sont donc peu utiles pour évaluer les effets des neutrons.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

225. Comme on le sait bien en radiobiologie, l'étalement et le fractionnement de la dose peuvent aboutir à un effet atténué par rapport à celui d'une dose totale identique administrée en une seule fois. Les effets précoces des doses élevées chez l'homme ne font pas exception à cette règle générale. Les réponses prodromiques sont donc légèrement atténuées lorsque la dose est étalée ou fractionnée. De même, des débits de dose faibles ou une irradiation très fractionnée réduisent nettement les lésions à l'intestin et à la moelle osseuse chez toutes les espèces vivantes, y compris l'être humain. On a proposé diverses formules quantitatives pour évaluer les variations de dose ou d'effet dues à l'étalement; toutefois, la base de données pour de nombreux tissus étant fragmentaire, ces formules sont proposées à titre d'indications très approximatives pour l'établissement de prévisions. Il y a néanmoins une exception à la règle générale de l'étalement et du fractionnement : les testicules; la façon dont les cellules atteignent les phases sensibles rend en effet cet organe plus vulnérable à des doses étalées qu'à des doses uniques.

226. En général, des quantités importantes d'émetteurs internes sont nécessaires pour produire des effets précoces chez l'être humain. La dépression de la moelle osseuse se manifeste après des doses uniques élevées d'iode-131 et de caesium-137. Des maladies des rayons et des complications hématologiques légères ont été causées par les radiocolloïdes de l'or, de même que par le phosphore-32 et le soufre-35. On n'a signalé aucune lésion aiguë grave de l'intestin chez l'homme due aux émetteurs internes et les lésions du poumon ont été rares. Les traitements appliqués en cas de contamination interne consistent à réduire la rétention, faciliter l'élimination ou diminuer la translocation.

227. Il se peut qu'une faible fraction de la population soit particulièrement sensible aux lésions précoces dues aux rayonnements en raison de troubles génétiques hérités comme la télangiectasie ataxique. Les personnes qui en sont atteintes sont plus sensibles aux rayonnements. De nombreux autres troubles génétiques prédisposent à des lésions chromosomiques ou cellulaires accrues mais on ne dispose pas d'estimation quantitative de cet accroissement.

228. Pour les malades irradiés, il est difficile de fonder un pronostic uniquement sur l'estimation de la dose. Il y a de nombreux facteurs qui viennent compliquer le diagnostic : affection intercurrente, étalement de la dose et qualité du rayonnement. Le type et la durée des symptômes prodromiques, y compris les érythèmes, peuvent faciliter le pronostic. Les signes hématologiques, particulièrement le nombre des lymphocytes, sont aussi de bons indices. Il importe aussi de connaître le niveau minimal atteint par les différentes cellules sanguines et le moment où il a été enregistré, ainsi que la durée de l'aplasie de la moelle après des doses élevées. L'apparition de jeunes cellules et la persistance dans le sang sont généralement un signe favorable de reconstitution de la moelle. Il convient toutefois, d'asseoir le pronostic sur tout un éventail de types divers de données et de les revoir constamment.

229. Les renseignements que l'Union soviétique a communiqués à l'appendice à l'annexe J au sujet des victimes de l'accident de Tchernobyl sont à la fois complets et utiles. La nature des lésions observées ne constitue certes pas un fait nouveau mais le degré de précision avec lequel on a déterminé leur apparition, leur importance et leur durée permet de comprendre beaucoup mieux les effets biologiques qui résultent de doses élevées de rayonnement à l'être humain. Il serait extrêmement utile de continuer à étudier ces conclusions, particulièrement

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

en ce qui concerne les questions suivantes : évaluation précise des doses reçues par les victimes, corrélation entre les divers symptômes et signes et les agents qui les ont causés (le type d'exposition a été complexe et a comporté une irradiation tant interne qu'externe ainsi que des lésions d'origine thermique). Ces études complémentaires enrichiront considérablement nos connaissances actuelles et permettront en dernier lieu d'inclure les données recueillies à Tchernobyl dans les autres conclusions examinées à l'annexe G. Le Comité remercie tous ceux qui ont aidé à établir l'appendice d'avoir accepté de participer à ces travaux et les félicite de leur compétence ainsi que de la compréhension qu'ils ont manifestée pour leurs semblables en cette tragique occasion.

4. Effets de l'irradiation prénatale

230. Dans sa dernière étude sur les effets biologiques des irradiations prénatales qui est reproduite dans son rapport de 1986, le Comité a examiné les données les plus récentes sur l'évolution dans le temps, particulièrement du cerveau des embryons et foetus de mammifères, et les enfants exposés à des rayonnements avant leur naissance au cours des bombardements atomiques d'Hiroshima et de Nagasaki. Il a fait reposer ce bilan, autant que possible, sur l'expérience humaine et l'a étendu à des effets qui n'avaient pas encore été examinés sous ce jour, par exemple les effets cancérigènes de l'irradiation in utero.

231. Selon les données de 1986, le retard mental est le type le plus probable d'anomalie du développement dans l'espèce humaine. Essentiellement, l'étude dans le temps montre que la probabilité de retard mental radioinduit est quasiment nulle lorsque l'exposition a lieu moins de huit semaines après la conception, maximale en cas d'exposition entre la 8e et la 15e semaine et qu'elle diminue entre la 16e et la 25e semaine. Aucun retard mental grave n'a été signalé dans le cas d'irradiations survenant plus de 25 semaines après la conception à des doses inférieures à 1 Gy. En suppposant un rapport linéaire entre l'effet et la dose (comme l'indiqueraient les chiffres), on estime que la probabilité d'induction par unité de dose absorbée est de 0,4 par Gy au moment où la sensibilité est maximale et de l'ordre de 0,1 Gy entre la 16e et la 25e semaine après la conception.

232. Utilisant toutes les données dont il disposait, le Comité a essayé d'établir des estimations de risque quantitatives au sujet d'un certain nombre d'effets des rayonnements pour lesquels il existe des données d'observation ou, au moins, une présomption suffisante d'induction. Parmi ces effets figurent, non seulement le retard mental mais la mortalité et l'induction de malformations, de leucémie et d'autres affections malignes. Sur la base d'un certain nombres d'autres hypothèses, le Comité a estimé qu'une dose au produit de la conception de 0,01 Gy, pendant toute la grossesse, créerait une probabilité supplémentaire d'effets nuisibles pour la santé chez le nouveau-né de moins de 0,002. Le risque normal qu'un nouveau-né vivant non irradié présente les mêmes troubles est de l'ordre de 0,06. De nouvelles informations semblent indiquer qu'il y a lieu d'abaisser sensiblement les estimations de risque mentionnées dans les deux derniers paragraphes (notamment pour les faibles doses). Le Comité envisage donc de les revoir prochainement.

C. Calcul des coefficients de risque

233. Dans les situations qui sont décrites dans les annexes, les sujets sont exposés à une gamme de rayonnements de divers types et les doses reçues par leur organisme sont souvent inégales. Pour additionner les doses provenant de diverses sources, telles que les sources naturelles de rayonnement, il y a lieu d'utiliser

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

une grandeur qui tient compte de ces divers types de rayonnement et de la répartition des doses dans l'organisme. La grandeur utilisée par le Comité est l'équivalent de dose efficace. Celui-ci s'obtient en pondérant la dose absorbée par un tissu par deux facteurs, l'un qui reflète l'efficacité du type de rayonnement reçu et l'autre la diversité de la sensibilité biologique des tissus. L'équivalent de dose efficace est la somme de ces doses absorbées, après pondération.

234. Les valeurs des deux séries de coefficients de pondération ont été recommandées par la CIPR. Le Comité a parfois envisagé l'adoption d'autres systèmes de pondération mais a décidé jusqu'ici que l'équivalent de dose efficace répondait à ses besoins. Cette grandeur n'est utilisée que pour évaluer les effets à long terme tels que la cancérogénèse. C'est la dose absorbée qui permet d'évaluer le mieux les effets précoces des doses élevées.

235. Par "risque" (au sens quantitatif), le Comité entend la probabilité d'un effet nuisible tel que le décès radioinduit et exprime souvent cette probabilité en pourcentage. La quantité d'effets prévus dans une population donnée est exprimée en nombre de cas par millier ou par million d'habitants. L'expression "coefficient de risque" désigne généralement le risque par dose unitaire (risque par gray pour les doses absorbées et risque par sievert pour l'équivalent de dose efficace). Etant donné que la dose et le risque ne sont pas toujours proportionnels, il est parfois nécessaire de préciser également la dose ou l'éventail de doses auxquels le coefficient s'applique.

236. Le Comité ne s'est pas contenté d'estimer le risque. Il a également évalué le nombre prévu d'années de vies perdues par une population du fait de la mortalité radioinduite. Cette grandeur et le nombre projeté de cas ou de décès au sein de la population exposée sont parfois baptisés "mesures de détriment collectif".

1. Dommage héréditaire

237. On peut définir les coefficients de risque génétique comme s'appliquant à l'équivalent de dose ou à l'équivalent de dose efficace aux gonades. Il convient aussi de décider si ces coefficients doivent s'appliquer aux doses génétiquement significatives (autrement dit aux doses aux individus reproducteurs) ou bien aux doses moyennes à l'ensemble de la population. Il peut sembler absurde d'un point de vue scientifique d'opter pour cette dernière solution mais on ne connaît parfois que les doses moyennes ou les doses collectives totales; en outre, les coefficients de risque pour le cancer s'appliquent souvent aux doses moyennes.

238. Dans l'annexe E au présent rapport ("Les risques génétiques"), le Comité a présenté une synthèse des connaissances actuelles sur les effets héréditaires des rayonnements ionisants. Cette synthèse est résumée à la section D.1 du chapitre II. Plusieurs moyens s'offrent d'ordinaire pour présenter les données scientifiques. L'un consiste à procéder à une évaluation pour une situation à l'équilibre où une population stable a été irradiée sur de nombreuses générations à raison d'une certaine dose unitaire aux gonades délivrée à chaque individu procréateur, homme ou femme, puis à estimer la fraction de la descendance qui est susceptible d'être atteinte de dommage héréditaire. On peut aussi évaluer le nombre de descendants atteints d'une génération génitrice où, soit les hommes, soit les femmes, soit les deux sexes groupés, ont reçu une dose collective.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

239. Dans l'un et l'autre cas, l'information peut se traduire par un coefficient de risque qui exprimera soit la probabilité, pour un individu procréateur, de donner naissance à un enfant atteint de dommage héréditaire, soit le nombre probable d'enfants atteints, par unité de dose individuelle ou collective délivrée aux gonades des individus procréateurs. Le coefficient de risque peut être élargi de manière à inclure le dommage pour toutes les générations à venir.

240. Ces coefficients de risque peuvent être appliqués directement aux estimations de la dose génétiquement significative, du type de celles qui ont été établies pour diverses procédures d'examens radiodiagnostiques. Toutefois, on ne peut pas les appliquer aux équivalents de dose efficace à moins d'une exposition uniforme du corps entier. Dans les autres cas, le coefficient applicable de risque génétique peut prendre toute valeur entre 0 (si les gonades ne sont pas exposées) et quatre fois le coefficient de risque applicable à la dose relative aux gonades (si seules celles-ci sont exposées), le coefficient applicable aux gonades étant égal à 1/4.

241. Si l'équivalent de dose efficace est évalué non pas pour les individus procréateurs mais pour des individus moyens de l'ensemble de la population, le coefficient de risque pertinent n'est alors que le rapport F/L du coefficient de risque génétique qui s'appliquerait aux individus procréateurs, F étant l'âge procréateur moyen, si L l'espérance de vie à la naissance. Si F est de l'ordre de 30 ans et L de l'ordre de 75 ans, le coefficient de risque génétique pour l'individu moyen ne représente plus que 40 % du coefficient applicable aux individus procréateurs.

242. Le tableau 8 présente succinctement les estimations actuelles du Comité en ce qui concerne les coefficients de risque génétique. Une masse abondante de renseignements sur la nature du risque génétique est contenue dans le rapport de 1986.

243. Une comparaison avec les estimations précédentes (voir tableau 1) montre que les estimations actuelles sont inférieures à celles de 1977. La CIPR s'est servie des estimations de 1977 pour définir l'équivalent de dose efficace. Les coefficients de risque se rapportent uniquement au nombre prévu de maladies héréditaires graves quantifiables. Le Comité continuera d'étudier la question de savoir ce que cela signifie en termes de détriment.

Tableau 8

Coefficients de risque génétique révisés

(Pourcentage par Sv) a/

	Pour l'équivvalent de doses aux gonades		Pour l'équivalent de doses efficace	
	Population procréatrice	Population totale	Population procréatrice	Population totale
Deux premières générations	0,3	0,1	0 - 1,2	0 - 0,5
Toutes les générations	1,2	0,5	0 - 5	0 - 2

a/ Les risques imputables à des maladies à étiologie complexe n'ont pas été évalués.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

2. Cancer

244. Il est possible d'exprimer les coefficients de risque de cancer soit : a) en tant que probabilité individuelle, dépendant du cancer radioinduit futur (mortel) par dose unitaire; soit b) sous forme de détriment collectif. Celui-ci peut être exprimé soit par le nombre estimé de décès dus au cancer (ou cas de cancer) dans la population exposée. soit par le nombre d'années de vie individuelle perdues du fait des décès résultant de cancer, par dose collective unitaire.

245. Les nouvelles évaluations de l'annexe F ("La radiocancérogénèse chez l'homme"), sont celles du risque du cancer pour des doses de 1 Gy à un débit de dose élevé de rayonnement à faible TLE. Il convient néanmoins de souligner que, pour la première fois, une mortalité supplémentaire par le cancer a été observée à Hiroshima et à Nagasaki : pour certains cancers et tissus à des doses de 0,2 à 0,5 Gy. Non seulement les risques ont été évalués avec suffisamment de certitude pour neuf types de cancer, mais encore le risque total pour tous les autres types de cancer a été évalué de façon indépendante. Les estimations du risque incluent une prévision reposant sur les observations relatives aux populations exposées d'Hiroshima et de Nagasaki. Les nouvelles estimations tiennent compte des révisions de la dosimétrie. Tout ceci a contribué à relever les valeurs des estimations de risque à ces doses et débits de dose.

a) Risque individuel lié au tissu

246. Le tableau 9 contient un bilan résumé des résultats de l'étude Hiroshima-Nagasaki en ce qui concerne la probabilité individuelle de décès dû à un cancer radioinduit lié au tissu. Il donne deux séries de chiffres : l'une a été établie d'après les prévisions reposant sur le modèle de risque additif (absolu), l'autre (chiffres entre parenthèses) d'après les prévisions établies sur la base du modèle de risque multiplicateur (relatif).

247. Le coefficient total de risque de mortalité par cancer pour des individus moyens (moyenne aussi des deux sexes) est de 4,5 % par gray dans le cas du modèle du risque additif et de 7.1 % par gray dans le cas du modèle du risque multiplicatif. Il est possible de comparer ces chiffres à l'estimation de 1977 pour les doses élevées, qui était d'environ 2,7 % par sievert sur la base du modèle du risque additif (voir le tableau 3). On trouvera au tableau 10 d'autres données sommaires concernant les coefficients de risque pour d'autres groupes d'âge et d'autres circonstances.

248. Les problèmes rencontrés pour déterminer les coefficients de risque qui s'appliquent aussi à des doses faibles sont restés les mêmes. Ces coefficients ne peuvent être déduits que des valeurs observées aux doses modérées à élevées. En 1977, alors que le coefficient total de risque de cancer, pour des doses élevées, était estimé de l'ordre de 2,5 % par sievert, le Comité a formulé plusieurs réserves notant en particulier que : la valeur de cette estimation pour les doses élevées était trop faible parce que l'on n'avait pas établi de prévisions, mais aussi trop élevée en ce sens que le risque par dose unitaire aux doses faibles était considéré comme inférieur aux estimations pour les doses élevées.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

Tableau 9

Probabilité de décès par cancer supplémentaire par personne à la suite de l'exposition à une dose absorbée de 1 Gy à débit de dose élevé de rayonnement à faible TLE

(Pourcentage)

(Chiffres basés sur la population du Japon en utilisant un coefficient moyen de risque par âge)

	Modèle de projection du risque multiplicatif	Modèle de projection du risque additif
Moelle osseuse rouge	0,97	0,93
Tous cancers à l'exception de la leucémie	6,1	3,6
Vessie	0,39	0,23
Sein a/	0,6	0,43
Côlon	0,79	0,29
Poumon	1,5	0,59
Myélome multiple	0,22	0,09
Ovaire a/	0,31	0,26
Oesophage	0,34	0,16
Estomac	1,3	0,86
Divers	1,1	1,0
Total	7,1	4,5

a/ Le chiffre doit être divisé par 2 pour calculer le total et les risques afférents aux autres organes.

249. Dans le présent rapport, le Comité continue d'être confronté au problème de l'établissement de coefficient de risque à faible dose et à faible débit de dose. Le Comité a convenu qu'il était nécessaire, pour les doses et les débits de doses faibles, d'appliquer un facteur de réduction aux risques mentionnés au tableau 9. Il a estimé que ce facteur variait considérablement en fonction du type de tumeur et du débit de dose. Il a cependant jugé que, pour les doses et débits de doses faibles, il fallait appliquer au risque total un facteur de 2 à 10. Le Comité a l'intention d'étudier cette question en détail prochainement.

250. De manière générale, le Comité n'a pas présenté dans le présent rapport d'estimations de risque pour les rayonnements à TLE élevé (sauf en ce qui concerne l'exposition au radon des mineurs d'uranium). Pour les faibles doses de rayonnements à TLE élevé, il conviendrait de multiplier par un facteur de qualité

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

approprié les risques relatifs aux rayonnements à faible TLE. Le Comité n'a pas jugé nécessaire d'appliquer un coefficient de réduction des doses ou débits de dose pour les faibles doses de rayonnements externes à TLE élevé.

b) Détriment collectif

251. En multipliant les coefficients de risque correspondant au risque individuel par la dose collective pertinente, on obtient le nombre probable de morts par cancer dans la population exposée, à condition que la dose collective soit d'au moins de l'ordre de 100 hommes Sv. Si la dose collective n'est que de quelques hommes Sv, il n'y aura probablement aucun décès.

252. Le Comité a également évalué le nombre d'années de vie individuelle perdues par dose collective unitaire en raison d'une mortalité par cancer radioinduit. Les résultats pour les doses élevées et les débits de dose élevés de rayonnements à faible TLE sont brièvement présentés au tableau 10. La perte totale est d'environ une année d'individu par homme Gy avec deux modèles de prévision.

Tableau 10

Estimation de risque total de mort par cancer encouru par 1 000 personnes (500 hommes et 500 femmes) exposées à 1 Gy de débit de dose élevé de rayonnements à faible TLE

(Sur la base de la population du Japon)

	Modèle de risque	Nombre de décès par cancer supplémentaire	Nombre d'années de vie perdues
Population totale	Additif	30-50	700-1 200
	Multiplicatif	70-100	950-1 400
Population active (18-65 ans)	Additif	40	880
	Multiplicatif	80	970
Population adulte (plus de 25 ans)	Additif	30	510
	Multiplicatif	60	650

D. Comparaison des expositions

1. Précédentes comparaisons du Comité

253. La manière dont il devait présenter les radioexpositions imputables à diverses sources a toujours posé un problème au Comité. Dans son rapport de 1958, il a évalué la dose moyenne à la moelle osseuse par tête et la dose génétiquement significative pour la population mondiale résultant de diverses sources et de diverses pratiques. Dans ce même rapport, il a aussi calculé le nombre escompté de cas de leucémie et de dommages héréditaires dus au rayonnement de fond naturel et aux explosions nucléaires.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

254. Dans son rapport de 1962, le Comité a évalué les doses par tête dues à l'irradiation naturelle des gonades, des couches superficielles des os et de la moelle osseuse rouge. Il a calculé aussi les engagements de dose à la population mondiale correspondant aux mêmes organes ainsi que les doses génétiquement significatives pour les expositions médicales et professionnelles. Cependant, dans ce rapport, il a estimé qu'il accordait moins de crédit aux coefficients du risque utilisés dans le rapport de 1958 et qu'il ne se considérait pas en mesure d'évaluer les détriments. A son avis, à titre de remplacement, les estimations de doses et d'engagements de dose pouvaient servir pour évaluer le risque comparatif. Il a présenté ce risque comparatif en relation avec le rayonnement de fond naturel auquel il a attribué la valeur 1. Cette comparaison portait sur les radioexpositions à des fins médicales et sur les expositions résultant d'explosions nucléaires par rapport à la leucémie, aux tumeurs osseuses et aux effets héréditaires. Sur la même base, le Comité a estimé que le détriment dû aux diverses sources pourrait être exprimé en termes d'exposition au fond naturel de rayonnement, ce qui permettrait d'obtenir la même dose ou le même engagement de dose par tête.

255. Dans ses rapports de 1964, 1969 et 1972, le Comité a continué d'exprimer le risque provenant des explosions nucléaires en termes de période équivalente d'exposition au rayonnement naturel. Jusqu'en 1972, il a calculé des doses ou des engagements de dose par tête pour l'ensemble de la population mondiale. Pour un nombre mondial d'habitants donné, ceci implique une évaluation de la dose collective provenant de chaque source. Dans son rapport de 1977, le Comité a pour la première fois explicitement présenté des évaluations de dose collective pour diverses sources et diverses pratiques. A la même époque, néanmoins, il a établi les comparaisons sur la base de périodes équivalentes d'exposition au rayonnement naturel. Dans son rapport de 1982, outre l'évaluation des engagements de dose collective, le Comité donna un plus grand nombre d'informations que précédemment sur la manière dont les expositions individuelles variaient. Dans le résumé et les conclusions du rapport, les équivalents de dose collective ont été convertis en périodes équivalentes de rayonnement de fond naturel.

256. Il ressort de ce bref rappel que la comparaison avec le débit de dose de fond a joué un grand rôle dans le mode de présentation que le Comité a adopté pour ses évaluations. Quand, en 1958, le Comité a évalué le nombre de personnes atteintes, il a établi une comparaison avec l'incidence naturelle du cancer et des maladies héréditaires. Depuis, les doses par tête et les doses collectives ont été comparées avec les doses engendrées par le rayonnement naturel.

2. Objet des comparaisons

257. Les comparaisons sont généralement établies à certaines fins qui déterminent la manière dont elles sont présentées. Les comparaisons avec les doses ou les détriments dus aux sources naturelles de rayonnement peuvent contribuer à mettre en lumière l'importance radiologique relative d'autres sources de rayonnement mais renseignent peu sur la mesure dans laquelle elles sont justifiables ou acceptables. Il peut être utile de savoir si les doses ont été faibles ou élevées par rapport au rayonnement naturel pour déterminer si des études épidémiologiques sont justifiées. En comparant les doses de rayonnement ou les risques résultant de différentes procédures ayant toutes le même objectif, par exemple des informations médicales à des fins diagnostiques, il est possible de savoir quelle est la procédure préférable du point de vue de la radioprotection mais non pas s'il existe d'autres risques ou inconvénients. Le Comité n'ayant pas d'utilisation immédiate pour ces comparaisons, il tient à présenter ces données sous une forme qui permette d'utiliser les renseignements à des fins diverses.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

3. Comparaison des doses collectives

258. Si l'on connaît les coefficients de risque et si l'on peut établir des hypothèses quant au rapport entre la dose et la réponse, on peut alors calculer le détriment dû au rayonnement, par exemple le nombre probable de morts par cancer, à partir des renseignements sur les engagements de dose collective. Pour établir des comparaisons, il suffit de comparer les doses collectives ou les doses par tête (ce qui revient au même) dues aux diverses sources, ce qui élimine les incertitudes inhérentes aux coefficients de risque. Pour de telles comparaisons, il est possible de retenir comme référence la dose collective annuelle due aux sources de rayonnement naturel, et la contribution des autres sources sera exprimée en termes de périodes équivalant au rayonnement naturel, ce que le Comité fait depuis 1962.

259. Lorsqu'on compare des doses collectives provenant de sources différentes, il importe que cette comparaison soit fondée sur une base pertinente. Ceci est facile lorsque les sources et les pratiques visent toutes les mêmes objectifs, par exemple la production d'énergie ou la collecte de renseignements médicaux à des fins de diagnostic. Dans les autres cas, on doit veiller à trouver une base commune. Par exemple, il ne paraîtrait guère opportun de comparer des doses collectives reçues par des populations et pendant des périodes arbitrairement choisies. En revanche, les comparaisons de doses collectives dues à des pratiques entièrement différentes peuvent ne présenter aucun intérêt en elles-mêmes mais parfois aider à définir des mesures prioritaires en ce qui concerne les conséquences radiologiques.

4. Comparaison de doses individuelles

260. Les doses individuelles de rayonnement délivrées à un individu par diverses sources sont normalement comparées à la dose qu'il reçoit de sources naturelles. Une dose supplémentaire, qui est peu importante par rapport à la dose provenant du rayonnement naturel, n'aura pas d'incidence notable sur l'individu concerné, autrement dit elle ne modifiera pas sensiblement le bilan global d'irradiation de cet individu. Même si celui-ci souhaite, malgré tout, éviter des doses aussi faibles, il doit savoir qu'elles ne présentent aucun risque appréciable. Il ne faut pas entendre par là que la source responsable est acceptable en raison de la faiblesse de la dose : cela dépend du préjudice total qu'elle peut entraîner et de l'attitude de la société à l'égard de ce préjudice.

261. Dans le cas d'une distribution inégale des doses parmi une population, la comparaison des doses par tête risque d'induire en erreur; il se peut qu'aucun des intéressés ne reçoive cette dose par tête mais que la dose reçue soit parfois plus élevée ou plus faible. Dans ce cas, il conviendrait peut-être mieux de comparer des doses caractéristiques ainsi que des doses limites.

5. Bilan des comparaisons de dose

262. Le tableau 11 récapitule les diverses estimations des doses de rayonnement. De même que dans les rapports précédents, il indique, en plus des engagements de dose collective, la période équivalente d'exposition au rayonnement naturel. Pour comparer ces chiffres avec ceux des rapports précédents, il convient de se rappeler que la dose annuelle due au rayonnement naturel, qui était estimée à 100 mrads (correspondant à environ 1 mSv) dans le rapport de 1977, est évaluée à 2,4 mSv dans le présent rapport. Cette augmentation est intervenue pour les deux raisons suivantes : a) au lieu d'indiquer les doses à un certain nombre d'organes, le Comité indique l'équivalent de dose efficace et b) il a été tenu compte de la contribution importante des produits de la filiation du radon.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

263. Le tableau 11 donne nécessairement une présentation très condensée des données disponibles. Il est intéressant de noter que près de la moitié du rayonnement naturel est due à l'irradiation des poumons par les produits de la filiation du radon. Sont radioexposés professionnellement les membres de la profession médicale ainsi que les travailleurs de l'industrie nucléaire et de la radiographie industrielle. L'exposition qui intervient dans le cadre de la production d'énergie nucléaire est due aux radionucléides qui sont libérés au cours des activités d'extraction de l'uranium et d'élimination des déchets ainsi que lors de l'exploitation des réacteurs en vue de la production d'électricité. Un tiers environ des radioexpositions d'origine nucléaire est imputable aux émissions de radon provenant des résidus du traitement et un autre tiers des décharges de carbone-14 provenant de l'exploitation des réacteurs, surtout des réacteurs à eau lourde.

264. A l'intérieur de l'engagement d'équivalent de dose efficace collective (autre que celui qui est dû aux essais d'explosions nucléaires), 1,5 million d'hommes Sv sont dus à des radionucléides de période courte et 3,5 millions d'hommes Sv à des contributions valables à ce jour aux doses individuelles sur l'ensemble de la vie essentiellement imputables au strontium-90 et au caesium-137. L'accident de Tchernobyl ayant essentiellement affecté l'Europe, c'est l'engagement d'équivalent de dose efficace collective et non la dose mondiale par tête qui a été présenté.

Tableau 11

Tableau récapitulatif des estimations d'équivalents de dose efficace

	Doses individuelles annuelles actuelles (mSv)		Engagement de dose collective	
Source ou pratique	Par tête (population mondiale)	Caractéristiques (individus exposés)	Million par homme/Sv	Equivalent d'années de rayonnement naturel
ANNUELLE			Par année de pratique :	
Rayonnement naturel	2,4	1,0-5,0	11	1
Radioexpositions à des fins médicales (diagnostic)	0,4-1,0	0,1-10,0	2-5	0,2-0,5
Radioexposition professionnelle	0,002	5-5,0	0,01	0,001
Production d'énergie d'origine nucléaire	0,0002	0,001-0,1	0,001	0,0001
			(0,03) a/	(0,004) a/
UNIQUE			Par pratique totale :	
Toutes les explosions dues à des essais nucléaires	0,01	0,01	5 (26) a/	0,5 (2,4) a/
Accidents nucléaires			0,6	

a/ Entre parenthèses sont indiqués les engagements supplémentaires de dose collective à long terme dus au radon et au carbone-14 provenant de la production d'énergie d'origine nucléaire ainsi qu'au carbone-14 provenant des essais d'explosions nucléaires.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

6. Comparaison directe des détriments

265. Dans le présent rapport, le Comité a fait le bilan des connaissances actuelles en matière de risques dus au rayonnement et est allé jusqu'à indiquer un ordre de grandeur pour les facteurs de risque des doses de rayonnement faibles ainsi que des doses de rayonnement élevées. Il a également évalué les doses collectives dues à diverses sources et pratiques. Il est tentant de regrouper ces estimations et de calculer le nombre probable de cas de cancer et de maladies héréditaires.

266. Depuis l'accident, on a établi de nombreuses estimations de ce type, à partir de coefficients de risque de fiabilité inégale et à des fins extrêmement diverses. Les résultats sont très variables et dépendent des hypothèses générales. Pour un certain nombre de raisons, le Comité hésite à ajouter ses propres évaluations du détriment à celles qui ont déjà été faites pour les diverses sources de rayonnement.

267. D'abord, le Comité ne doit pas perdre de vue le mandat qui lui a été assigné : il a pour tâche d'évaluer les doses et non d'effectuer des jugements de valeur ou de fixer des normes. Comme il est ressorti clairement de la discussion qui figure à la section D.4 du chapitre III, même les évaluations de risques qui se veulent scientifiques reposent sur des hypothèses et des décisions qui, elles, ne le sont pas exclusivement. Même les grandeurs physiques employées par le Comité reposent sur ces hypothèses. C'est ainsi que l'équivalent de dose efficace comprend par définition des facteurs de pondération qui dépendent de décisions subjectives quant à ce qui constitue un dommage radioinduit. Chaque étape ultérieure du traitement des informations de base nécessitera ou impliquera probablement des appréciations non scientifiques.

268. En outre, la présentation des faits scientifiques de base déterminera les conclusions. Ainsi, un chiffre de plusieurs milliers de décès par cancer dû à un accident unique est sans aucun doute élevé. Comme ces décès s'étaleront probablement sur une longue période, leur nombre annuel sera néanmoins faible. Autrement dit, l'accroissement ne représentera qu'une faible proportion du nombre de cancers d'origine naturelle et n'apparaîtra probablement pas dans les statistiques en matière de santé. Ceci montre qu'il est possible de créer des impressions différentes en présentant différemment les données.

269. Enfin, ces estimations sont extrêmement imprécises. On a souligné à la section C du chapitre III que les coefficients de risques de cancer pour des doses faibles ne peuvent être calculés qu'à partir des observations correspondant aux doses élevées et que les coefficients de risques d'effets héréditaires n'ont même pas été établis par déduction à partir des observations relatives à l'être humain. Bien que le Comité estime que ces estimations actuelles sont les meilleures possibles compte tenu de l'état des connaissances, il se doit de les accompagner de réserves en appelant l'attention sur les hypothèses et les incertitudes sous-jacentes. En considérant une estimation quelconque d'un nombre donné de décès par cancer, on a hélas trop vite tendance à oublier le contexte et les conditions dans lesquelles elle a été établie.

270. Pour ces raisons, le Comité préfère s'en tenir à son habitude, qui consiste à comparer les engagements de dose collective dus aux principales sources de rayonnement plutôt que les estimations de détriments.

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

Notes

1/ Le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants a été créé par l'Assemblée générale à sa dixième session en 1955. Son mandat est défini dans la résolution 913 (X) du 3 décembre 1955. Le Comité comprenait à l'origine les Etats Membres suivants : Argentine, Australie, Belgique, Brésil, Canada, Egypte, Etats-Unis d'Amérique, France, Inde, Japon, Mexique, Royaume-Uni de Grande-Bretagne 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 Etats suivants : Allemagne (République fédérale d'), Indonésie, Pérou, Pologne et Soudan. Par sa résolution 41/62 B du 3 décembre 1986, l'Assemblée générale a porté à 21 membres la composition du Comité et a invité la Chine à en devenir membre.

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

3/ Cette question est examinée en détail à l'annexe A ("Irradiations par les sousces naturelles de rayonnement").

4/ Cette question est examinée en détail à l'annexe B ("Exposition résultant de la production d'énergie d'origine nucléaire").

5/ Cette question est examinée en détail à l'annexe C ("L'exposition due aux utilisations médicales de l'irradiation").

6/ Cette question est examinée à l'annexe B ("Exposition résultant de la production d'énergie d'origine nucléaire") et à l'annexe C ("L'exposition due aux utilisations médicales de l'irradiation").

7/ Cette question est examinée en détail à l'annexe D ("Expositions dues à l'accident de Tchernobyl").

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

8/ Cette question est examinée en détail à l'annexe E ("Les risques génétiques").

9/ Cette question est examinée en détail à l'annexe F ("La radiocancérogenèse chez l'homme").

10/ Cette question est examinée en détail à l'annexe G ("Effets précoces de l'irradiation à fortes doses chez l'homme").

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

APPENDICE I

Liste des membres des délégations nationales qui ont pris part aux trente et unième à trente-septième sessions du Comité

ALLEMAGNE, REPUBLIQUE FEDERALE D'

A. Kaul (Représentant), U. Ehling, W. Jacobi, H. Kriegel, F. E. Stieve, C. Streffer

ARGENTINE

D. Beninson (Représentant), D. Cancio, A. J. Gonzalez, E. Palacios

AUSTRALIE

K. H. Lokan (Représentant)

BELGIQUE

M. Errera (Représentant), J. Maisin (Représentant), J. Aten, P. Lohman, T. H. Sobels, A. D. Tates

BRESIL

E. Penna Franca (Représentant), L. R. Caldas (Représentant)

CANADA

E. G. Létourneau (Représentant), A. M. Marko (Représentant), W. R. Bush, G. C. Butler, B. C. Lentle, D. K. Myers

CHINE

Wei Lüxin (Représentant), Li Deping, Wu Dechang

EGYPTE

S. El-Din Hashish (Représentant), H. Roushdy (Représentant), M. El-Kharadly

ETATS-UNIS D'AMERIQUE

F. A. Mettler (Représentant), R. D. Moseley (Représentant), R. E. Anderson, L. R. Anspaugh, R. Baker, C. Edington, J. H. Harley, R. C. Ricks, H. H. Rossi, W. L. Russel, P. B. Selby, W. K. Sinclair, J. W. Thiessen, E. W. Webster, H. O. Wyckoff

FRANCE

H. Jammet (Représentant), A. Bouville, R. Coulon, M. Bertin, B. Dutrillaux, J. Lafuma, G. Lemaire, R. Masse, P. Pellerin, M. R. Tubiana, G. Uzzan.

INDE

N. K. Notani (Représentant), K. Sundaram (Représentant)

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

INDONESIE

S. Wiryosimin (Représentant), A. Baiquni (Représentant), O. Iskandar (Représentant), M. Ridwan (Représentant), C. J. Sugiarto

JAPON

T. Kumatori (Représentant), H. Matsudaira (Représentant), T. Terasima (Représentant), A. Kasai, A. Yamato

MEXIQUE

E. Araico (Représentant), J. R. Ortiz Magaña (Représentant)

PEROU

L. V. Pinillos Ashton (Représentant), M. Zaharia (Représentant)

POLOGNE

Z. Jaworowski (Représentant), L. Liniecki (Représentant), Z. Szot

ROYAUME-UNI DE GRANDE-BRETAGNE ET D'IRLANDE DU NORD

J. Dunster (Représentant), R. H. Clarke, S. C. Darby, J. Denekamp, J. H. Edwards, K. E. Halnan, P. S. Harper, A. Searle

SOUDAN

A. Hidayatalla (Représentant), A. A. Yousif

SUEDE

B. Lindell (Représentant), G. Bengtsson, K. Edvarson, L.-E. Holm, K. G. Lüning, S. Mattsson, J. O. Snihs, J. Valentin, G. Walinder

TCHECOSLOVAQUIE

M. Klímek (Représentant)

UNION DES REPUBLIQUES SOCIALISTES SOVIETIQUES

L. A. Ilyin (Représentant), A. Guskova (Représentant), K. M. Barkchudarov, V. Denim, E. Golubkin, D. F. Khokhlova, A. A. Moiseev, Yu. I. Moskalev, V. Pavlinov, O. Pavlovsky, O. Piatak, V. V. Redkin, V. A. Shevchenko

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

APPENDICE II

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

L. R. Anspaugh
B. G. Bennett
A. Bouville
R. H. Clarke
F. Fagnani
L. Frittelli
A. Hagen
J. Hendry
B. Lindell
F. A. Mettler
M. Morrey
O. Pavlovsky
W. J. Schull
G. Silini
F. D. Sowby
K. Sankaranarayanan
G. A. M. Webb
K. Weiss

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

APPENDICE III

Liste des rapports reçus par le Comité

1. Sont énumérés ci-après les rapports que le Comité a reçus des gouvernements entre le 19 avril 1986 et le 17 juin 1988.

2. Les titres des rapports que le Comité a reçus avant le 19 avril 1986 sont énumérés dans les précédents rapports du Comité à l'Assemblée générale.

Document	Pays	Titre
A/AC.82/G/L. 1732	Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord	Environmental Radioactivity surveillance programme: results for the UK for 1984, 21 avril 1986
1733	Japon	Radioactivity Survey Data in Japan, No 72, mars 1985, 16 juillet 1986
1734	Japon	Radioactivity Survey Data in Japan, No 73, juin 1985, 16 juillet 1986
1735	Etats-Unis d'Amérique	Environmental Measurements Laboratory: A compendium of the EML's research projects related to the Chernobyl nuclear accident, 10 décembre 1986
1736	Etats-Unis d'Amérique	Environmental Measurements Laboratory: The high altitude sampling programme: radioactivity in the stratosphere, 10 avril 1987
1737	Japon	Radioactivity Survey Data in Japan, No 74, septembre 1985, 10 avril 1987
1738	Japon	Radioactivity Survey Data in Japan, No 75, décembre 1985, 10 avril 1987
1739	Union des Républiques socialistes soviétiques	Assessment of population doses from X-ray examination in the USSR (1970-1980), 13 avril 1987
1740	Union des Républiques socialistes soviétiques	Genetic effects of radio-nuclide decay, 13 avril 1987

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

Document	Pays	Titre
1741	Union des Républiques socialistes soviétique	Acute radiation effects in man, 13 avril 1987
1742	Union des Républiques socialistes soviétiques	Production and release of carbon-14 in nuclear power stations with RBMK reactors, 13 avril 1987
1743	Union des Républiques socialistes soviétiques	Body burden of fall-out caesium-137 in the inhabitants of Moscow 1980-1983, 13 avril 1987
1744	Union des Républiques socialistes soviétiques	Radiation doses to the inhabitants of the far north, 13 avril 1987
1745	Union des Républiques socialistes soviétiques	Occupational exposure of radiographic workers, 13 avril 1987
1746	Japon	Radioactivity Survey Data in Japan, No 76, mars 1986, 2 juillet 1987
1747	Japon	Radioactivity Survey Data in Japan, No 77, juin 1986, 2 juillet 1987
1748	Japon	Radioactivity Survey Data in Japan, No 78, octobre 1987, 18 décembre 1987
1749	Japon	Radioactivity Survey Data in Japan, No 79, octobre 1987, 18 décembre 1987
1750	Union des Républiques socialistes soviétiques	Proposals for setting possible intake limits for transuranium radio-nuclides absorbed from the gastro-intestinal tract, 31 mai 1988
1751	Union des Républiques socialistes soviétiques	The evaluation of non-stochastic effects in man from low doses of internal irradiation, 31 mai 1988
1752	Union des Républiques socialistes soviétiques	Tritium production in LWGR power plants and its release into the environment, 31 mai 1988

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

Document	Pays	Titre
1753	Union des Républiques socialistes soviétiques	Medical treatment in the case of uranium intoxication, 31 mai 1988
1754	Union des Républiques socialistes soviétiques	Dynamics of effective dose equivalent from intake of strontium-90 and caesium-137, 31 mai 1988
1755	Union des Républiques socialistes soviétiques	Specific activities of natural radionuclides in building materials used in the Soviet Union, 31 mai 1988

Digitized by Dag Hammarskjöld Library

كيفية الحصول على منشورات الأمم المتحدة

يمكن الحصول على منشورات الأمم المتحدة من المكتبات ودور التوزيع في جميع أنحاء العالم . استعلم عنها من المكتبة التي تتعامل معها أو اكتب إلى : الأمم المتحدة ، قسم البيع في نيويورك أو في جنيف .

如何购取联合国出版物

联合国出版物在全世界各地的书店和经售处均有发售。请向书店询问或写信到纽约或日内瓦的联合国销售组。

HOW TO OBTAIN UNITED NATIONS PUBLICATIONS

United Nations publications may be obtained from bookstores and distributors throughout the world. Consult your bookstore or write to: United Nations, Sales Section, New York or Geneva.

COMMENT SE PROCURER LES PUBLICATIONS DES NATIONS UNIES

Les publications des Nations Unies sont en vente dans les librairies et les agences dépositaires du monde entier. Informez-vous auprès de votre libraire ou adressez-vous à : Nations Unies, Section des ventes, New York ou Genève.

КАК ПОЛУЧИТЬ ИЗДАНИЯ ОРГАНИЗАЦИИ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ

Издания Организации Объединенных Наций можно купить в книжных магазинах и агентствах во всех районах мира. Наводите справки об изданиях в вашем книжном магазине или пишите по адресу: Организация Объединенных Наций, Секция по продаже изданий, Нью-Йорк или Женева.

COMO CONSEGUIR PUBLICACIONES DE LAS NACIONES UNIDAS

Las publicaciones de las Naciones Unidas están en venta en librerías y casas distribuidoras en todas partes del mundo. Consulte a su librero o diríjase a: Naciones Unidas, Sección de Ventas, Nueva York o Ginebra.

Litho in United Nations, New York

00900

19371 — August 1988 — 1,100

Digitized by Dag Hammarskjöld Library