

DR HE ~~2073~~ 1248-2 Ed.-Fr.-
DÉPARTEMENT DES RADIOÉLÉMENTS
DOCUMENTATION

PROTECTION CONTRE LES RAYONNEMENTS

RECOMMANDATIONS DE LA COMMISSION INTERNATIONALE DE PROTECTION RADIOLOGIQUE

PUBLICATION CIPR 1

RAPPORT DU COMITÉ II SUR LA DOSE ADMISSIBLE EN CAS D'IRRADIATION INTERNE

PUBLICATION CIPR 2

1959

Traduit par Madame A. DUCHÊNE
sous la direction du Docteur H. JAMMET
Département de la Protection Sanitaire
Commissariat à l'Énergie Atomique



Publié pour
la Commission Internationale de Protection Radiologique
par
GAUTHIER-VILLARS EDITEUR
PARIS
1963

Traduction faite d'après l'ouvrage original
publié pour
LA COMMISSION INTERNATIONALE DE PROTECTION RADIOLOGIQUE
par

PERGAMON PRESS

sous le titre

Report of Committee II on Permissible Dose for Internal Radiation (1959)

SOMMAIRE

	PAGE
RECOMMANDATIONS DE LA COMMISSION	IX
ADDENDUM	XXXI

RAPPORT DU COMITÉ II

REMERCIEMENTS	VIII
I. INTRODUCTION	1
Principaux changements intervenus dans les recommandations fondamentales	1
Comparaison avec le précédent rapport	2
Principes directeurs pour l'application de ce rapport	2
II. NORMES FONDAMENTALES D'IRRADIATION INTERNE MAXIMALE ADMISSIBLE	3
1. Catégories d'exposition	3
2. Exposition professionnelle	4
Dose EBR délivrée aux gonades et à l'organisme entier	4
Dose EBR délivrée à l'os	4
Dose EBR délivrée à des organes autres que les gonades, l'or- ganisme entier et l'os	4
Variations admissibles du débit de dose	5
Réduction en cas d'exposition externe simultanée	5
Débit de dose trimestriel	5
Débit de dose pour personnes plus âgées	6
3. Exposition de groupes spéciaux	6
Adultes travaillant au voisinage d'une zone contrôlée	6
Adultes pénétrant occasionnellement dans une zone contrôlée	6
Individus du public habitant au voisinage d'une zone contrôlée	7
4. Exposition des populations	7
Dose génétique	7
Dose somatique	7
III. VALEURS MAXIMALES ADMISSIBLES POUR L'EXPOSITION PROFESSIONNELLE	
1. Hypothèses fondamentales et restrictions s'appliquant aux valeurs maximales admissibles d'exposition indiquées au tableau 1	8
Fondées sur l'homme standard	8
Fondées sur des données recueillies sur l'homme et sur l'animal	8
Fondées sur l'absorption d'air ou d'eau	9
Valeurs données pour les composés solubles et pour les composés insolubles	9

	PAGE
Période présumée d'exposition	10
Fondées sur la quantité réelle de radioélément dans l'organisme ; absence d'équilibre	10
Absorption limitée à un seul élément ; exceptions	10
Données biologiques présentées selon le modèle à compartiments ; fonction puissance	10
Prolongation de la période d'exposition	11
Consommation d'eau et débit respiratoire	11
Dose à prendre en considération pour les gaz rares	11
Effets toxiques	12
2. Unités de rayonnement ionisant utilisées dans le tableau 1	12
3. Organe critique du corps	12
IV. CALCUL DES VALEURS D'EXPOSITION MAXIMALE ADMISSIBLE	14
1. Bases d'estimation des valeurs d'exposition maximale admissible	14
2. Quantité admissible dans l'organisme par comparaison avec le radium	15
Application à des émetteurs α et β se localisant dans l'os	15
Facteur de dommage relatif, n	15
Norme fondamentale de radium, c'est-à-dire 0,1 μg	17
3. Quantité admissible dans l'organisme fondée sur un débit de dose EBR admissible au niveau de l'organe critique	18
4. Concentrations dans l'air et dans l'eau, établies d'après le modèle exponentiel, pour des organes critiques autres que le tractus gastro-intestinal	19
Equations des CMA pour absorption continue ; un seul radionuclide	20
Equations donnant les quantités présentes dans un organe après absorption unique ; chaîne parent-produits de filiation	21
Equations donnant les quantités présentes dans un organe en cas d'absorption continue ; chaîne parent-produits de filiation	21
Equations des CMA pour absorption continue ; chaîne parent-produits de filiation	22
5. Concentrations dans l'air et dans l'eau établies sur la base de la dose EBR délivrée à divers segments du tractus GI	23
Equations des CMA pour l'intestin ; un seul radionuclide	23
Equations des CMA pour l'intestin ; chaîne parent-produits de filiation	23
Equations des CMA pour l'estomac ; un seul radionuclide	24
Equations des CMA pour l'estomac ; chaîne parent-produits de filiation	24
6. Concentrations dans l'air pour les gaz rares et autres gaz relativement inertes	25

	PAGE
Equations des CMA	25
Valeurs des CMA pour ^{220}Rn et ^{222}Rn	26
7. Concentrations maximales admissibles de radionuclides non identifiés	27
8. Concentration maximale admissible d'un mélange connu de radionuclides	28
Tableau A. Calcul de la CMA pour un mélange de radionuclides	30
9. Modifications nécessaires pour d'autres applications	30
 V. FACTEURS NÉCESSAIRES À LA RÉOLUTION DES ÉQUATIONS DES CMA	32
1. Energie effective	32
Définition de l'EBR, de n et de F_i	33
Equations donnant F_i	33
2. Données relatives à l'homme standard	34
3. Autres facteurs biologiques et physiques associés	35
Définition de I , f_1 , C , f'_2 et f_2	36
Définition de f_a	37
Définition de f_e , T_b , T_r et T	38
 APPENDICE	40
Concentrations dans l'air et dans l'eau établies selon le modèle de la fonction puissance	40
Tableau B. Valeurs des CMA calculées à l'aide du modèle de la fonction puissance	43
 BIBLIOGRAPHIE	44
 TABLEAUX	
Tableau 1. Quantités maximales admissibles dans l'organisme et concentrations maximales admissibles de radionuclides dans l'air et dans l'eau, en cas d'exposition professionnelle	47
Tableau 2. Radionuclides qui n'atteignent pas l'équilibre dans l'organisme en 50 ans	91
Tableau 3. Concentration maximale admissible de radionuclides non identifiés dans l'eau (valeurs CMANI)	92
Tableau 4. Concentration maximale admissible de radionuclides non identifiés dans l'air (valeurs CMANI)	93
Tableau 5. Energies effectives	94
Tableau 5a. Energies effectives pour les chaînes	118
Tableau 6. Répartition des éléments dans l'ensemble de l'organisme de l'homme standard	152

	PAGE
Tableau 7. Eléments contenus dans les divers organes de l'homme standard	153
Tableau 8. Organes de l'homme standard ; masse et rayoneffectif des organes du corps humain adulte	157
Tableau 9. Absorption et excrétion chez l'homme standard	158
Tableau 10. Particules de poussière dans l'appareil respiratoire de l'homme standard	159
Tableau 11. Tractus gastro-intestinal de l'homme standard .	159
Tableau 12. Constantes biologiques et physiques associées .	160
INDEX	237

REMERCIEMENTS

Le « Rapport du Comité II sur la dose admissible en cas d'irradiation interne (1959) » résulte des efforts conjugués d'un grand nombre de personnes appartenant à de nombreux pays. Pour élaborer ce rapport, le Comité II de la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) a travaillé en collaboration étroite avec le Sous-Comité 2 de la dose d'irradiation interne admissible du Comité National de Protection contre les Rayonnements et des Mesures des États-Unis (CNPR) et le manuscrit ci-dessous peut être considéré comme un travail commun de ces deux groupes. Pour les remercier de leur coopération, nous mentionnons ici les noms des membres du Sous-Comité 2 du CNPR :

K. Z. MORGAN, Président	J. B. HURSH
A. M. BRUES	L. D. MARINELLI
P. W. DURBIN	W. S. SNYDER
J. W. HEALY	SHIELDS WARREN

En outre, de nombreux scientifiques d'autres pays ont non seulement contribué à ce travail par leurs recherches originales qui constituent la base de ce rapport, mais ont également apporté une aide précieuse en interprétant et en adaptant leurs résultats pour satisfaire aux conditions étudiées dans ce rapport. Enfin, le travail technique consistant à rassembler les données et à les interpréter en fonction des conditions d'exposition professionnelle ainsi que la rédaction du texte sont dus pour une grande part au Service de Dosimétrie interne du Laboratoire National d'Oak Ridge dirigé par le Dr K. Z. MORGAN. Ont été chargés, en particulier, de la collecte et de la présentation des données biologiques : Mary Jane COOK ; des données physiques utilisées et des calculs : Mary Rose FORD ; J. MUIR et Janet KOHN ont calculé respectivement les valeurs données dans les tableaux pour le tractus gastro-intestinal et pour les énergies effectives ; et le Dr W. S. SNYDER a supervisé l'ensemble du travail technique et exercé les fonctions de Secrétaire du Comité II de la CIPR pour l'élaboration de ce rapport. Enfin, le Comité rend hommage à l'aide précieuse apportée par le Comité de Publication de la CIPR lors de l'édition définitive de ce rapport.¹

Les membres du Comité International II présentant ce rapport sont :

K. Z. MORGAN, Président	M. K. NAKAIDZUMI
W. BINKS	G. J. NEARY
A. M. BRUES	M. N. POBEDINSKI
W. H. LANGHAM	E. E. POCHIN
L. D. MARINELLI	C. G. STEWART
W. G. MARLEY	

¹ Au cours des réunions de la CIPR à Munich, en juillet 1959, la Commission a adopté un certain nombre de « Notes explicatives et Amendements » qui constituent un supplément aux Recommandations de 1958. Ces Notes explicatives et Amendements ont été adoptés après que le rapport du Comité II ait été approuvé, mais comme ils apportent des éclaircissements et une interprétation des Recommandations de 1958 de la Commission sur plusieurs points intéressant le rapport du Comité II, ils ont été inclus dans ce volume.

RECOMMANDATIONS DE LA COMMISSION INTERNATIONALE DE PROTECTION RADIOLOGIQUE

PREFACE

LA Commission Internationale de Protection Radiologique (C.I.P.R.) fonctionne depuis 1928, date à laquelle elle a été créée, sous le nom de Commission Internationale de Protection contre les Rayons X et le Radium, par le deuxième Congrès international de Radiologie qui s'est tenu à Stockholm (Suède). Elle a pris son nom et sa forme d'organisation actuels en 1950, de manière à couvrir plus sûrement le domaine de la protection contre les rayonnements dont l'expansion était très rapide.

Les recommandations publiées dans ce volume représentent des idées générales et des pratiques élaborées au cours de discussions lors de réunions officielles et de réunions officieuses de la Commission et de ses Sous-Comités, au cours des dernières années. Avant la deuxième guerre mondiale, la Commission publiait des recommandations environ tous les 3 ans. La première réunion après la guerre fut tenue à Londres en 1950. Une réunion officieuse eut lieu à Stockholm en 1952 en liaison avec la Conférence organisée par le Comité mixte international de Radiobiologie, essentiellement pour étudier les effets génétiques des radiations. La réunion suivante eut lieu à Copenhague en 1953, date à laquelle quatre des Sous-Comités tinrent pour la première fois des réunions officielles. Les résultats des délibérations ont été publiés en 1955 dans le supplément n° 6 du *British Journal of Radiology*.^{*} La Commission et ses Sous-Comités se réunirent à nouveau au printemps 1956 à Genève ; au cours de cette réunion, la plupart des recommandations exposées ci-dessous ont été adoptées dans leur principe. C'est également lors de cette réunion que la Commission s'affilia officiellement à l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S.) en tant qu'« Organisation non-gouvernemental participant ».

La Commission (C.I.P.R.) et la Commission Internationale des Unités Radiologiques (C.I.

U.R.) tinrent une réunion commune exceptionnelle à New York, à la fin de l'année 1956, pour examiner une invitation émanant du « Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des radiations ionisantes » en vue d'une coopération dans la partie du travail relative à l'exposition due aux techniques médicales. Les deux Commissions acceptèrent la tâche qui leur était assignée et présentèrent au Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des radiations ionisantes un rapport publié dans le numéro d'octobre 1957 de la revue *Physics in Medicine and Biology*. Les fonds nécessaires pour couvrir les dépenses engagées dans la préparation du rapport ont été fournis par le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des radiations ionisantes. En même temps que cette réunion mixte, la Commission tint une réunion officieuse pour poursuivre la discussion des nouvelles recommandations à la suite des délibérations qui avaient eu lieu à Genève au début de l'année. Il y eut encore d'autres discussions lors d'une autre réunion exceptionnelle de la Commission, tenue à New York au printemps 1958. Un Comité de publication ad hoc fut alors désigné pour activer la préparation des manuscrits. Ce Comité se réunit pendant deux semaines à New York, au mois de mai, et prépara un premier projet de recommandations qui fut envoyé à tous les membres de la Commission. Le Comité se réunit à nouveau dans la deuxième quinzaine de juillet et corrigea le premier projet conformément aux suggestions faites par les membres de la Commission. En même temps, le Comité de publication révisa également les projets des rapports envoyés par les Sous-Comités de la Commission.

Lors de la rédaction des recommandations de la Commission, le Comité de publication jugea nécessaire de remplir certaines lacunes relatives à des sujets qui n'avaient pas été discutés et approuvés formellement par la Commission. C'est pourquoi, on profita de la présence à Genève de sept membres de la Commission, en

^{*} Ces recommandations ont paru en français dans le *Journal de Radiologie, d'Electrologie et Archives d'Electricité médicale*, 1955, 36, n° 10bis, Octobre.

septembre 1958, pour réviser le deuxième projet et apporter les modifications nécessaires. Les amendements furent envoyés aux membres qui n'avaient pas pu assister à cette réunion. Le projet définitif comprend encore d'autres commentaires faits par des membres de la Commission.

De nombreuses personnalités qui n'étaient pas membres de la Commission, ont été consultées lors de l'élaboration de ces recommandations et nous tenons à les remercier ici de leur coopération. En particulier, les recommandations concernant la dose génétique ont été discutées entre le Président du Comité de publication et plusieurs généticiens renommés au X^e Congrès International de Génétique à Montréal en août 1958. Il faut remarquer également que lors de sa réunion à Genève, en 1956, le Comité I prépara le premier projet des nouvelles recommandations adoptées alors par la Commission, qui sont à la base des recommandations publiées ci-dessous.

Au cours de ces dernières années, la Commission a reçu une aide financière de la Société Internationale de Radiologie, de l'Association Nationale des Compagnies d'Assurances Suédoises, ainsi que des subventions d'origine privée suédoise, pour les dépenses occasionnelles de secrétariat. En fait, tout le travail de la Commission a été fait bénévolement par ses membres et par des membres de ses Comités. La Commission leur est très redevable pour leurs efforts, ainsi qu'aux organismes auxquels ils appartenaient, pour l'aide reçue dans le domaine tech-

nique et pour les travaux de secrétariat. L'Organisation Mondiale de la Santé a couvert les frais de voyage de quelques membres du Comité de publication et fourni une subvention pour les travaux de secrétariat et les faux frais occasionnés par la préparation et la mise en circulation des manuscrits. La Commission tient à exprimer ici sa profonde reconnaissance pour ces subventions sans lesquelles l'élaboration des recommandations ci-dessous aurait été rendue très difficile.

Le Président du Comité de publication et le Secrétaire temporaire tiennent à remercier les membres de la Commission pour leurs réponses rapides et efficaces aux nombreux questionnaires et aux votes qui ont dû être envoyés lors de la préparation du manuscrit définitif. Que les membres du Comité de publication qui ont préparé les deux premiers projets reçoivent ici également les remerciements qui leur sont dus.

La Commission est heureuse d'annoncer que Pergamon Press a accepté généreusement la responsabilité financière de la publication et de la diffusion (à des prix réduits et en abandonnant tout droit de reproduction) de ce volume et d'autres encore en préparation qui contiendront les rapports des Sous-Comités de la Commission.

Rolf M. SIEVERT

Président de la C.I.P.R.

Gioacchino FAILLA

Vice-Président de la C.I.P.R.

*Président du Comité de
Publication*

ORGANISATION

Statuts régissant la composition et le travail de la Commission Internationale de Protection Radiologique.

(1) La Commission Internationale de Protection Radiologique (C.I.P.R.) remplit ses fonctions sous les auspices du Congrès International de Radiologie. Les règles suivantes, revues en 1953 par le Comité Exécutif International (C.E.I.) du Congrès, régissent la composition et le travail de la C.I.P.R.

I. (a) La Commission Internationale de Protection Radiologique est composée d'un Président et de douze membres au maximum. Ces membres sont choisis par le Comité Exécutif International sur une liste nominative proposée par les délégations nationales et par la Commission Internationale de Protection Radiologique elle-même. Les membres de la C.I.P.R. sont choisis pour leur activité reconnue dans les domaines de la radiologie, de la protection radiologique, de la physique, de la biologie, de la génétique, de la biochimie et de la biophysique, sans tenir compte de leur nationalité.

(b) Les membres de la C.I.P.R. sont choisis au cours d'un Congrès International pour exercer leurs fonctions jusqu'au Congrès suivant. Deux au moins, mais quatre au plus des membres de la C.I.P.R. sont remplacés à chaque Congrès. Si, dans la période intermédiaire, une place devient vacante pour des raisons indépendantes du C.E.I., la C.I.P.R. est chargée de la pourvoir.

(c) Au cas où l'un des membres de la C.I.P.R. ne pourrait se rendre aux réunions de la Commission, la C.I.P.R. pourra lui choisir un remplaçant temporaire. Ce remplaçant n'a pas droit de vote, à moins que le C.E.I. ne l'y ait expressément autorisé.

(d) La C.I.P.R. pourra inviter à ses réunions des spécialistes pour leur demander des avis techniques. Ces experts n'ont pas droit de vote, mais peuvent demander que leur avis soit consigné dans le procès-verbal.

II. Les archives de la C.I.P.R. sont confiées

à un Secrétaire, élu par la C.I.P.R. parmi ses membres titulaires et agréé par le C.E.I.

III. La C.I.P.R. se tient au courant des progrès réalisés dans le domaine de la protection contre les rayonnements. Le Secrétaire est responsable de la préparation du programme proposé à la Commission comme sujet de discussion au cours de ses réunions. Des rapports préliminaires seront rédigés et envoyés à tous les membres de la C.I.P.R. et à d'autres personnalités spécialement qualifiées, au moins six mois avant la réunion du Congrès.

IV. Le Président est élu par la C.I.P.R. au cours d'un Congrès pour exercer ses fonctions jusqu'au Congrès suivant. Son choix n'est pas limité au pays où doit se tenir le prochain Congrès.

V. Les décisions de la C.I.P.R. sont prises par vote à la majorité, le Président tranchant le débat en cas de partage égal des voix. L'opinion de la minorité pourra être annexée au procès-verbal de la réunion si un membre le désire et à condition qu'il en fasse la demande écrite au Secrétaire.

Politique de la Commission

(2) La ligne de conduite adoptée par la C.I.P.R. pour l'élaboration de ses recommandations est d'établir les principes fondamentaux de la protection contre les rayonnements et de laisser aux différents Comités de Protection nationaux le droit et la responsabilité d'adopter les règlements, recommandations ou codes de travail pratiques les mieux adaptés aux besoins de leurs pays respectifs.

(3) Les recommandations de la Commission ont été révisées de façon permanente, de manière à couvrir le nombre et l'étendue sans cesse accrus des risques dus aux rayonnements et à modifier les facteurs de sécurité en fonction des nouvelles connaissances acquises sur les effets des rayonnements ionisants.

Relations officielles avec l'Organisation Mondiale de la Santé.

(4) Conformément aux règlements définis par l'Assemblée Mondiale de la Santé en ce qui concerne l'établissement de relations officielles entre les organismes non gouvernementaux et l'Organisation Mondiale de la Santé, des relations ont été établies entre la C.I.P.R. et l'O.M.S. en 1956 et réaffirmées en 1958. Cet accord a donné toute satisfaction et il est souhaité qu'il soit maintenu.

Composition de la C.I.P.R. et de ses Comités

(5) Lors de l'élaboration de ces recommandations, la composition de la C.I.P.R. était la suivante :

Commission principale

1953-1956

Sir ERNEST ROCK CARLING, Président (G.B.)
 W. BINKS, Secrétaire (G.B.)
 A. J. CIPRIANI (Canada)
 G. FAILLA (E.U.)
 H. HOLTHUSEN (Allemagne)
 J. C. JACOBSEN (Danemark)
 R. G. JAEGER (Allemagne)
 W. V. MAYNEORD (G.B.)
 K. Z. MORGAN (E.U.)
 R. M. SIEVERT (Suède)
 R. S. STONE (E.U.)
 L. S. TAYLOR (E.U.)

✶ M. TUBIANA (France)

1956-

R. M. SIEVERT, Président (Suède)
 G. FAILLA, Vice-Président (E.U.)
 W. BINKS, Secrétaire * (G.B.)
 L. BUGNARD (France)
 H. HOLTHUSEN (Allemagne)
 J. C. JACOBSEN (Danemark)
 R. G. JAEGER (Allemagne)
 W. V. MAYNEORD (G.B.)
 K. Z. MORGAN (E.U.)
 R. S. STONE (E.U.)
 L. S. TAYLOR (E.U.)
 E. A. WATKINSON (Canada)
 Sir ERNEST ROCK CARLING (Président honor.) (G.B.)

* M. BINKS démissionna de ses fonctions de Secrétaire en 1957 pour raisons de santé. Après cette démission, E. E. SMITH (G.B.) remplit les fonctions de Secrétaire intérimaire et depuis le 1^{er} août 1957, B. LINDELL (Suède) remplit les fonctions de Secrétaire temporaire

Comité I (Dose admissible en cas d'irradiation externe)

1953-1956

G. FAILLA, Président (E.U.)
 L. BUGNARD (France)
 D. G. CATCHESIDE (Australie)
 J. C. JACOBSEN (Danemark)
 J. F. LOUTIT (G.B.)
 H. J. MULLER (E.U.)
 JENS NIELSEN (Danemark)
 R. M. SIEVERT (Suède)
 R. S. STONE (E.U.)
 SHIELDS WARREN (E.U.)

1956-

G. FAILLA, Président (E.U.)
 A. R. GOPAL-AYENGAR (Inde)
 G. BONNIER (Suède)
 L. BUGNARD (France)
 D. G. CATCHESIDE (G.B.)
 J. C. JACOBSEN (Danemark)
 T. KEMP (Danemark)
 ✶ R. LATARJET (France)
 J. F. LOUTIT (G.B.)
 H. J. MULLER (E.U.)
 JENS NIELSEN (Danemark)
 R. M. SIEVERT (Suède)
 R. S. STONE (E.U.)
 SHIELDS WARREN (E.U.)

Comité II (Dose admissible en cas d'irradiation interne)

1953-1956

K. Z. MORGAN, Président (E.U.)
 W. BINKS (G.B.)
 A. M. BRUES (E.U.)
 A. J. CIPRIANI (Canada)
 W. H. LANGHAM (E.U.)
 L. D. MARINELLI (E.U.)
 W. G. MARLEY (G.B.)
 G. J. NEARY (G.B.)
 E. E. POCHIN (G.B.)

1956-

K. Z. MORGAN, Président (E.U.)
 W. BINKS (G.B.)
 A. M. BRUES (E.U.)
 W. H. LANGHAM (E.U.)
 L. D. MARINELLI (E.U.)
 W. G. MARLEY (G.B.)
 M. K. NAKAIDZUMI (Japon)
 G. J. NEARY (G.B.)
 M. N. POBEDINSKI (U.R.S.S.)
 E. E. POCHIN (G.B.)
 C. G. STEWART (Canada)

Comité III (Protection contre les rayons X d'énergie inférieure à 3 MeV et contre les rayonnements β et γ provenant de sources scellées).

1953-1956

R. G. JAEGER, Président (Allemagne)
S. BENNER (Suède)
C. B. BRAESTRUP (E.U.)
C. E. EDDY (Australie)
C. GARRETT (Canada)
H. HOLTHUSEN (Allemagne)
P. RØNNE (Danemark)
W. J. OOSTERKAMP (Pays-Bas)
E. E. SMITH (G.B.)
H. O. WYCKOFF (E.U.)
J. ZAKOVSKY (Autriche)

1956-

R. G. JAEGER, Président (Allemagne)
E. E. SMITH, Vice-Président (G.B.)
S. BENNER (Suède)
J. BOUCHARD (Canada)
C. B. BRAESTRUP (E.U.)
B. COMBEE (Pays-Bas)
C. GARRETT (Canada)
T. GAUWERKY (Allemagne)
H. HOLTHUSEN (Allemagne)
P. RØNNE (Danemark)
D. J. STEVENS (Australie) *
H. O. WYCKOFF (E.U.)
J. ZAKOVSKY (Autriche)
A. ZUPPINGER (Suisse)
Secrétaire Technique : W. HÜBNER (Allemagne).

Comité IV (Protection contre les rayonnements électromagnétiques d'énergie supérieure à 3 MeV et contre les électrons, les neutrons et les protons).

1953-1956

W. V. MAYNEORD, Président (G.B.)
L. H. GRAY (G.B.)
H. E. JOHNS (Canada)
H. W. KOCH (E.U.)
→ P. LAMARQUE (France)
J. S. LAUGHLIN (E.U.)
J. S. MITCHELL (G.B.)
B. MOYER (E.U.)
C. A. TOBIAS (E.U.)
F. WACHSMANN (Allemagne)

* A partir de mars 1958.

1956-

H. E. JOHNS, Président (Canada)
J. S. MITCHELL, Vice-Président (G.B.)
L. H. GRAY (G.B.)
F. HERCIK (Tchécoslovaquie)
G. JOYET (Suisse)
W. H. KOCH (E.U.)
J. S. LAUGHLIN (E.U.)
W. V. MAYNEORD (G.B.)
C. A. TOBIAS (E.U.)
→ M. TUBIANA (France)
F. WACHSMANN (Allemagne)

Comité V (Manipulation des isotopes radioactifs et évacuation des déchets radioactifs)

1953-1956

A. J. CIPRIANI, Président (Canada)
H. P. JAMMET (France)
A. KEY (G.B.)
W. G. MARLEY (G.B.)
E. E. POCHIN (G.B.)
E. H. QUIMBY (E.U.)
C. P. STRAUB (E.U.)
E. A. WATKINSON (Canada)
F. W. WESTERN (E.U.)

1956-

C. P. STRAUB, Président (E.U.)
E. E. POCHIN, Vice-Président (G.B.)
→ H. P. JAMMET (France)
A. W. KENNY (G.B.)
W. G. MARLEY (G.B.)
C. A. MAWSON (Canada)
A. PERUSSIA (Italie)
E. H. QUIMBY (E.U.)
F. D. SOWBY (Canada)
F. W. WESTERN (E.U.)
Secrétaire technique : G. G. ROBECK (E.U.)

1958 Comité de Publication (ad hoc)

G. FAILLA, Président (E.U.)
E. E. ANDERSON (E.U.)
B. LINDELL (Suède)
H. H. ROSSI (E.U.)
F. D. SOWBY (Canada)

RECOMMANDATIONS DE LA COMMISSION

A. APERÇU GENERAL

(1) Avant la réunion de la Commission à Genève, en avril 1956, les valeurs admissibles pour l'exposition aux rayonnements ionisants étaient exprimées sous forme de dose délivrée en un laps de temps assez court (un jour ou une semaine), c'est-à-dire essentiellement sous forme d'un débit de dose moyen — cette moyenne correspondant à la répartition dans le temps de la dose pour le laps de temps donné. Implicitement, si ce n'est explicitement, on supposait que si le débit de dose moyen était suffisamment faible, aucune lésion organique appréciable ne se manifesterait au cours de la vie de l'individu. Cette hypothèse reposait essentiellement sur l'expérience acquise en radiologie montrant que la peau présentait une restauration importante dans les quelques mois suivant une thérapeutique à faible dose. On observait en outre que, plus la dose (ou en cas d'exposition chronique, le débit de dose) était faible, plus la période de latence pour quelques effets tardifs (par exemple, cancer de la peau), consécutifs à une lésion résiduelle des tissus, était longue. Ainsi, dans le cas d'un individu exposé professionnellement, un effet à long terme pourrait ne pas se manifester durant le cours de sa vie, même si certaines lésions définitives avaient été produites.

(2) La dose fondamentale admissible en une semaine était à cette époque de 0,3 rem. Si l'on suppose qu'une personne est exposée professionnellement à ce débit de dose pendant 50 ans (50 semaines par an), la dose accumulée admissible serait de 750 rems pour les organes les plus critiques ou notamment pour l'organisme entier. On s'aperçut par la suite que cela constituait une dose « élevée » pour la durée de la vie et un avertissement en ce sens fut introduit par la Commission dans son rapport de 1955.

(3) La prise de conscience générale des dangers liés aux rayonnements amena les responsables de la protection des travailleurs à être prudents. Administrativement, de larges facteurs de sécurité étaient souvent appliqués surtout dans les grandes installations atomiques. Aussi, on observa qu'en général l'irradiation effective du personnel était maintenue à des taux bien inférieurs aux limites admissibles alors en vigueur.

(4) En 1956, au cours de la réunion de la Commission, il parut nécessaire de faire des recommandations plus strictes. La Conférence de 1955 sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques avait éveillé un grand intérêt pour la construction de centrales atomiques dans le monde entier. Il pourrait en résulter dans l'avenir une augmentation sensible du nombre de personnes professionnellement exposées et, simultanément, une irradiation effective ou un risque d'irradiation d'autres personnes et même de l'ensemble de la population. Fait plus important, la pression pour une production d'énergie plus économique pourrait faire abandonner les « facteurs de sécurité » mentionnés plus haut. La durée moyenne de l'exposition professionnelle par travailleur pourrait également augmenter. Du point de vue biologique, on envisagea que la « restauration » jouait peut-être un rôle moins important qu'on ne le supposait auparavant, pour les effets à long terme qui pourraient résulter d'une exposition continue à de faibles doses de rayonnement. En raison de l'augmentation du nombre de personnes qui seraient exposées, professionnellement ou non, le dommage génétique prenait une importance plus grande, d'autant plus que l'on s'aperçut que, dans certains pays, la dose génétique per capita, résultant des techniques médicales, était du même ordre de grandeur que celle due à la radioactivité naturelle.

(5) Des études statistiques avaient montré que l'incidence des leucémies était sensiblement plus importante chez les radiologues que chez les autres médecins dont on pouvait admettre qu'ils n'étaient pas professionnellement exposés aux rayonnements. Ces radiologues comprenaient naturellement ceux qui avaient pratiqué leur spécialité à un moment où la protection radiologique n'était pas toujours mise en œuvre. Aussi, est-il possible que les doses accumulées par ceux qui furent atteints de leucémie aient été bien supérieures aux 750 rems mentionnés ci-dessus. Par contre, comme la plupart de ces expositions résultaient de l'utilisation des rayons X de faible énergie à des fins diagnostiques, la dose accumulée pendant la vie entière au niveau des organes hématopoïétiques peut avoir été

inférieure à 750 rems, même si la dose à la peau, en particulier dans certaines parties du corps, était beaucoup plus importante. Le mécanisme de l'induction de la leucémie par les rayonnements n'est pas connu. On peut postuler que la leucémie ne se produit pas si la dose est inférieure à un certain seuil. Dans ce cas, il faudrait évaluer la dose-seuil et tenir compte de la restauration, dans la mesure où il y en a une. On ne dispose pas pour cela de renseignements suffisants, mais la prudence inciterait à croire qu'une dose accumulée de 750 rems pourrait dépasser le seuil. L'attitude la plus prudente serait d'admettre qu'il n'y a ni seuil, ni restauration, auquel cas même de faibles doses accumulées pourraient induire une leucémie chez certains individus prédisposés et l'incidence pourrait être proportionnelle à la dose accumulée. Il en est de même pour l'induction de tumeurs osseuses par les substances radioactives ostéotropes.

(6) Dans les études de longévité dont on dispose actuellement, les opinions diffèrent en ce qui concerne l'existence d'un raccourcissement statistiquement significatif de la durée de vie chez les radiologues par rapport à d'autres spécialistes dont on présumait qu'ils n'étaient pas professionnellement exposés aux rayonnements. Cependant, chez les mammifères soumis à une exposition chronique à différentes doses quotidiennes, on observe nettement un effet bien déterminé sur la longévité pour les doses quotidiennes les plus élevées. Si l'extrapolation à des doses quotidiennes plus faibles, puis à l'homme, est justifiée, on peut conclure que l'exposition professionnelle dans les limites admissibles actuellement acceptées, peut entraîner un certain raccourcissement de la vie. Cet effet peut être interprété comme une légère accélération du processus naturel de sénescence.

(7) Les conséquences que nous venons d'examiner illustrent les deux types différents d'effets somatiques à long terme dont on doit tenir compte pour établir des limites admissibles d'exposition. Le premier (leucémie) est un effet grave qui survient chez quelques individus ; aussi, le but de la protection sera-t-il de réduire son incidence à l'extrême limite possible. Le deuxième (raccourcissement de la vie) est probablement un effet qui se produit chez chaque individu ; aussi, le but de la protection sera-t-il de réduire l'effet lui-même autant qu'il est pra-

tiquement possible. La définition de la dose admissible a été modifiée pour inclure explicitement ces deux types d'effets éventuels.

(8) Les effets génétiques se manifestent chez les descendants des individus exposés. Le dommage, quand il apparaît, peut présenter divers degrés de gravité depuis les effets peu perceptibles jusqu'aux effets létaux. Un dommage léger tendra à se manifester chez les descendants pendant plusieurs générations, tandis qu'un dommage grave sera rapidement éliminé par le décès précoce de l'individu porteur du gène défavorable. Ainsi, globalement, l'effet d'un gène défavorable jusqu'à son élimination peut être considéré comme étant toujours approximativement le même. Ce qui importe essentiellement en matière de prévention du dommage génétique (mis à part l'aspect de malheur individuel que cela représente) c'est le fardeau qu'imposerait aux générations futures, un accroissement de la proportion d'individus porteurs de mutations délétères. Dans cet esprit, il est indifférent en fin de compte que les gènes défavorables soient introduits dans le patrimoine héréditaire par un petit nombre d'individus qui ont reçu des doses de rayonnement élevées ou par un grand nombre d'individus qui, ayant reçu des doses plus faibles, sont porteurs d'un nombre proportionnellement moins élevé de mutations. Cependant, même dans ce cas, il est souhaitable de limiter la dose reçue par un individu.

(9) Conformément à ce qui précède, les recommandations sont formulées dans ce rapport en termes de doses maximales admissibles pour des individus et pour des groupes de population. Dans les deux cas, on a fixé des limites sur la base d'une dose accumulée pendant plusieurs années, plutôt que sur la base d'une dose hebdomadaire qui pourrait être reçue pendant un temps illimité. L'idée d'une limitation de la dose accumulée a été introduite lors de la réunion de la Commission à Genève en 1956. La limitation proposée à cette époque pour la dose accumulée correspond approximativement à la réduction par un facteur trois de la dose hebdomadaire, par exemple, dans le cas d'une exposition professionnelle de l'organisme entier, lorsque l'intensité d'irradiation est approximativement constante.

(10) Dans la pratique, le problème le plus important est celui de l'exposition chronique

soit à de faibles intensités de rayonnement, soit à de faibles doses répétées. Dans ces conditions, il est raisonnable de considérer la dose accumulée en plusieurs années comme étant le facteur déterminant, à condition que les doses intermittentes soient suffisamment faibles. Ainsi, il faut non seulement limiter la dose accumulée, mais il est également nécessaire de limiter la valeur d'une dose unique (c'est-à-dire, d'une dose reçue en un court intervalle de temps). Auparavant, on admettait une exposition unique égale à la dose maximale admissible hebdomadaire (sept jours consécutifs). De la même manière, la limite proposée dans ce rapport pour la dose unique en cas d'exposition professionnelle est exprimée sous forme de dose maximale admissible accumulée en une période de « 13 semaines consécutives ». La dose limite recommandée pour un organe donné (par exemple, 3 rems pour les organes hématopoïétiques) a été fixée à une valeur aussi élevée que le permet la prudence à la lumière de nos connaissances actuelles. La stipulation de toute période de 13 semaines consécutives a été faite pour s'assurer que les opérations sont effectuées de telle manière que personne ne puisse recevoir à des intervalles de temps courts des doses répétées approchant chacune de la limite fixée pour 13 semaines.

(11) Dans les recommandations publiées en 1955, les limites maximales admissibles ont été fixées sur la base des doses reçues par certains organes et compte tenu de certains effets tardifs graves dont l'apparition dans ces organes pour des doses suffisamment élevées était connue. Des dispositions furent prises pour limiter la dose dans d'autres organes et tissus en adoptant une « courbe de distribution de dose » arbitraire (rapport du Comité I). Ces mesures étaient nécessaires en raison de l'adoption pour la peau d'une dose maximale admissible deux fois plus élevée que celle fixée pour les organes hématopoïétiques (dont la profondeur effective est supposée être 5 cm). Dans le présent rapport, des recommandations séparées sont formulées pour trois groupes d'organes ou de tissus :

- (a) Organes hématopoïétiques, gonades et cristallins.
- (b) Peau et glande thyroïde.
- (c) Tous les autres organes ou tissus, dans le cas où l'exposition est essentiellement limitée à cet organe ou à ce tissu.

(12) En ce qui concerne les organes hématopoïétiques, les gonades et les cristallins, les limites de l'exposition professionnelle sont établies sous forme d'une dose accumulée à différents âges, selon la formule $D = 5 (N-18)$, où D est la dose en rems et N l'âge en années, à condition toutefois que la dose accumulée au cours de toute période de 13 semaines consécutives ne dépasse pas 3 rems.

(13) Pour la peau et la glande thyroïde, la limite de l'exposition professionnelle est définie sous forme de dose accumulée en une période quelconque de 13 semaines consécutives, et la valeur recommandée est 8 rems. Cette valeur découle d'une moyenne de 0,6 rem/semaine (la dose hebdomadaire maximale admissible recommandée auparavant pour la peau de l'organisme entier), soit pour 13 semaines 7,8 rems ; on a pris le nombre entier le plus proche pour éviter de laisser croire à une précision que ne peuvent garantir les connaissances actuelles. La limite pour la dose accumulée dans ces tissus pendant une année est : $(0,6 \times 50) = 30$ rems. Il faut noter que la nouvelle recommandation s'applique à la dose à la peau elle-même, sans tenir compte de la répartition de la dose dans le tissu sous-cutané. Aussi, faut-il comparer cette valeur à celle recommandée auparavant dans le cas d'exposition à des rayonnements très peu pénétrants, à savoir la limite de 1,5 rem/semaine. Donc, dans ce cas également, la dose accumulée a été réduite, mais la limite pour une exposition unique a été élevée de 1,5 à 8 rems. Il devrait en résulter, dans la pratique, une plus grande souplesse d'application par rapport aux recommandations antérieures.

(14) Pour tous les organes et les tissus du corps humain, à l'exception des organes hématopoïétiques, des gonades et des cristallins, la limite de l'exposition professionnelle est définie sous forme de dose accumulée en une période quelconque de 13 semaines consécutives. A l'exception de la peau, les cas pratiques qui relèvent de cette catégorie, concernent l'irradiation à partir de sources internes, cette irradiation étant essentiellement limitée à un organe ou un tissu donné. Les points suivants doivent être signalés. Tandis que dans le cas des organes hématopoïétiques, des gonades, des cristallins et de la peau, la protection a pour objectif de prévenir ou de réduire au minimum des dom-

images connus de façon précise, on ne connaît pas, dans le cas des autres organes, le type de lésion que l'irradiation peut provoquer. (L'os constitue la seule exception : dans ce cas, le dommage en question est le cancer et des limites admissibles peuvent être fixées sur la base des données recueillies sur l'accumulation de radium dans le squelette de sujets humains). Il est possible qu'une dose suffisante de rayonnement augmente l'incidence du cancer dans l'un de ces organes (par exemple la glande thyroïde) ou accélère sa sénescence. En l'absence de données réelles, il avait semblé prudent, dans les recommandations antérieures de la Commission, de fixer pour ces organes, quand ils sont soumis à une irradiation interne, une limite maximale admissible aussi basse que celle adoptée pour les organes plus radiosensibles comme par exemple les gonades, c'est-à-dire 0,3 rem/semaine. Lorsque l'exposition est essentiellement limitée à un seul organe par suite de l'accumulation plus ou moins sélective d'un radioisotope donné au niveau de cet organe, il est évident que cette limite comporte un facteur de sécurité qui fait défaut quand l'organisme entier est exposé à la même dose admissible. Pour cette raison et parce qu'aucun de ces organes ne paraît être aussi radiosensible que les organes hématopoïétiques, les gonades et les cristallins, la Commission a décidé de conserver la dose maximale admissible antérieurement recommandée de 0,3 rem/semaine pour chaque organe pris isolément (à quelques exceptions près, indiquées dans le rapport du Comité II). Cependant, la limite est exprimée maintenant pour une période de 13 semaines consécutives, ce qui donne une dose de 4 rems, en chiffres ronds avec une dose accumulée annuelle de 15 rems. Le Comité II a fait les rectifications nécessaires pour se conformer aux limites admissibles plus basses recommandées maintenant pour certains organes et pour ce qui peut être considéré comme exposition de « l'organisme entier » (par exemple radioisotopes qui diffusent dans l'ensemble de l'organisme, ou plusieurs isotopes présents simultanément, chacun se concentrant de façon importante dans un organe différent).

(15) La Commission s'est préoccupée plus particulièrement du problème difficile de l'établissement de limites admissibles pour l'exposition des personnes demeurant au voisinage d'in-

stallations génératrices de rayonnements. Le principal obstacle est le manque presque total de connaissances sur les effets nocifs que peut entraîner chez l'homme une irradiation de faible intensité commençant dès la conception et se poursuivant durant la vie entière. On est en droit de s'attendre alors à des effets plus marqués que dans le cas où l'individu n'est irradié qu'après avoir atteint la maturité (ne serait-ce que parce que la période d'exposition est plus longue), mais il est très difficile de prendre une décision sur ce que l'on peut tolérer. Des indications pourraient être obtenues à ce sujet par des expériences adéquates pratiquées sur les mammifères et il faut espérer que de telles études seront bientôt entreprises dans quelques laboratoires. En attendant, il convient d'être prudent. La Commission recommande que, dans une ou des zones contrôlées, des dispositions soient prises pour s'assurer que, dans les conditions normales de fonctionnement, aucun enfant résidant à l'extérieur de ces zones ne reçoive (au niveau des organes considérés) une dose supérieure à 0,5 rem/an, du fait du rayonnement ou des substances radioactives produits dans cette ou ces zones contrôlées. En pratique, on peut prévoir que si des fluctuations se produisaient dans l'intensité d'irradiation, elles ne seraient pas d'une importance suffisante pour justifier des normes spéciales. Il faut remarquer que cette dose correspond au dixième de la plus faible dose annuelle admissible pour tout organe dans le cas d'exposition professionnelle. Cette dose comprend l'apport des sources externes et internes, mais les doses dues à l'irradiation naturelle ou aux techniques médicales en sont exclues.

(16) Pour certains groupes d'adultes résidant dans le voisinage d'une zone contrôlée, on admet des doses annuelles 3 fois plus élevées (c'est-à-dire 1,5 rem) au niveau des gonades, des organes hématopoïétiques et des cristallins. Aucune signification biologique ne doit être attribuée à ce facteur 3, car les renseignements radiobiologiques dont on dispose actuellement sont nettement insuffisants à cet égard. La valeur recommandée (1,5 rem par an) représente le dixième de la dose maximale annuelle admise auparavant pour l'exposition professionnelle, en prenant comme base la dose hebdomadaire de 0,3 rem au niveau des organes les plus radiosensibles (voir également paragraphes 54, 56 et 57).

(17) L'élaboration des programmes d'expansion future de l'énergie nucléaire et les projets d'utilisation plus étendue des rayonnements nécessitent des mesures destinées à protéger l'ensemble de la population. A ce point de vue, on tient compte surtout du dommage génétique. Le problème a été discuté par différents organismes nationaux et internationaux qui ont fait des suggestions à titre d'essai. La Commission a étudié ce problème au cours de la réunion de 1956 et a publié, par la suite, un rapport en termes généraux. Cependant, des recommandations quantitatives sont nécessaires pour élaborer des projets de centrales atomiques et d'autres installations génératrices de rayonnements et, tout spécialement, pour prévoir l'évacuation des déchets radioactifs. Il est très important, dans cet ordre d'idées, de s'assurer que rien n'est fait actuellement qui puisse se révéler par la suite comme un danger grave, auquel on ne pourrait parer ou bien auquel il serait très onéreux de parer. La Commission est consciente du fait qu'on ne peut encore dresser le bilan exact des risques et des avantages, car il faudrait pour cela une appréciation quantitative des dommages biologiques éventuels et des avantages probables qui ne peut être faite actuellement. De plus, il faut remarquer que les facteurs qui interviennent lorsqu'on pèse les risques et les bienfaits varient d'un pays à l'autre et que la décision finale doit être prise par chaque pays (dans la mesure où les opérations effectuées à l'intérieur d'un pays n'affectent pas les autres).

(18) La Commission tient à souligner qu'il est important d'affecter des pourcentages d'une dose génétique maximale admissible aux différents modes d'irradiation, afin que les responsables du contrôle dans une catégorie ne s'attribuent pas, dans leurs prévisions, une part disproportionnée de la dose totale admissible. On estime toutefois qu'il vaut mieux actuellement ne pas affecter des parts trop strictes. Un exemple de répartition est donné à titre indicatif à la fin du paragraphe 65.

(19) En résumé, la limite proposée pour la dose génétique a été obtenue de la manière suivante : des évaluations faites par différents organismes scientifiques nationaux et internationaux indiquent qu'une dose aux gonades de 6 à 10 rems par individu, accumulée depuis la

conception jusqu'à l'âge de 30 ans et provenant de toutes les sources artificielles, imposerait à la société un fardeau considérable dû au dommage génétique, mais que cette charge supplémentaire paraît acceptable et justifiable si l'on considère les avantages probablement de plus en plus grands qui résulteront de l'extension des applications pratiques de l'« énergie atomique ». Il existe actuellement une très grande incertitude quant à l'importance de ce « fardeau » (voir par exemple le rapport du Comité Scientifique des Nations Unies sur les effets des radiations ionisantes) ; c'est pourquoi il est très souhaitable de maintenir l'exposition des grandes populations à un niveau aussi bas que possible, compte tenu de la nécessité de créer des sources supplémentaires d'énergie pour faire face aux besoins de la société moderne. Une dose génétique de 10 rems à partir de toutes les sources artificielles est considérée par la plupart des généticiens comme le maximum absolu et tous préféreraient une dose plus faible. Dans certains pays, la dose génétique qui résulte des techniques médicales a été évaluée à environ 4,5 rems (voir le « Rapport d'une étude faite conjointement par la C.I.P.R. et la C.I.U.R. pour le Comité Scientifique des Nations Unies »). Par conséquent, si la limite pour la dose génétique à partir de toutes les sources artificielles était fixée à 6 rems, l'apport de toutes les sources autres que les sources médicales serait limité dans ces pays à 1,5 rem. Il s'ensuivrait des restrictions inacceptables pour ces pays. Donc, pour une question de nécessité pratique, la Commission recommande que l'exposition à des fins médicales soit considérée à part et qu'elle soit maintenue à la valeur la plus faible compatible avec les exigences de la pratique médicale moderne. L'étude commune de la C.I.P.R. et de la C.I.U.R. indique qu'en veillant attentivement à la protection des gonades, on réduirait considérablement la dose génétique due aux techniques médicales, sans en compromettre la valeur. Tenant compte de ces considérations, la Commission propose une limite de 5 rems pour la dose génétique due à toutes les sources d'irradiation artificielles et à toutes les activités humaines impliquant une irradiation, à l'exception de l'irradiation à des fins médicales.

(20) A l'heure actuelle, les sources artificielles (autres que l'irradiation à des fins médi-

cales) ne contribuent que dans une faible mesure à la dose génétique. En élaborant avec soin les programmes futurs, on pourra contrôler le taux d'augmentation et il se peut très bien que la valeur finale de cette contribution n'atteigne jamais la limite proposée de 5 rems. Comme la dose génétique qui résulte de l'exposition à des fins médicales est bien inférieure à 4,5 rems dans la plupart des pays et que, dans les pays où il n'en est pas ainsi, des efforts importants sont faits pour la réduire, on peut s'attendre à ce que la dose génétique totale réellement reçue par la population du monde entier soit bien inférieure à 10 rems, peut être même inférieure à 6 rems dans un avenir assez proche. De plus, si une réaction thermonucléaire peut être utilisée comme source d'énergie, le problème de la protection contre les rayonnements peut devenir beaucoup plus simple.

(21) La Commission se rend compte de ce que l'application des nouvelles recommandations peut entraîner des changements de structure dans certaines installations déjà existantes et/ou des modifications concernant les méthodes de travail. Comme, en fait, les nouvelles recom-

mandations sont plus strictes en raison de l'importance plus grande attribuée à la dose accumulée en un temps assez long, il n'est pas essentiel que ces modifications soient effectuées immédiatement, bien qu'évidemment cela soit souhaitable. On propose, à titre d'indication pratique, que la période de transition, au cours de laquelle les changements nécessaires seront effectués, ne dépasse pas cinq ans.

(22) La Commission insiste de nouveau sur le fait que la détermination de limites maximales admissibles tant pour l'exposition professionnelle que pour l'exposition non professionnelle (et surtout pour cette dernière) exige des informations quantitatives dont on ne dispose pas encore, sur les risques et les avantages d'une utilisation plus répandue de l'«énergie atomique». C'est pourquoi, la Commission souhaiterait obtenir de ceux qui sont chargés de la production ou de l'utilisation des rayonnements ionisants, des données de fait et des propositions, afin qu'une information aussi juste que possible puisse être mise à sa disposition au cours de ses délibérations futures.

B. NOTIONS FONDAMENTALES

OBJECTIFS DE LA PROTECTION RADIOLOGIQUE

(23) Les rayonnements ionisants peuvent provoquer des lésions qui se manifestent soit chez l'individu exposé, soit dans sa descendance : on les appelle respectivement lésions somatiques et lésions génétiques.

(24) Dans les lésions somatiques tardives sont comprises la leucémie et d'autres affections malignes, la diminution de la fertilité, les cataractes et le raccourcissement de la durée de vie. Les lésions génétiques se manifestent dans la descendance des individus irradiés et peuvent rester masquées pendant plusieurs générations. Leur effet nocif peut se propager à travers toute une population par suite de l'union d'individus exposés avec d'autres membres de la population.

(25) La protection radiologique a pour but de prévenir ou de restreindre le plus possible les lésions somatiques, ainsi que de réduire au minimum les dommages génétiques pour la population.

ORGANES ET TISSUS CRITIQUES

(26) Les organes et tissus de l'organisme présentent divers degrés de radiosensibilité ; il est donc nécessaire, aux fins de protection, de considérer leur radiosensibilité en liaison avec leurs fonctions spécifiques aussi bien que les doses reçues. Selon les conditions de l'irradiation, certains organes et tissus prennent une importance prépondérante. On les appelle organes ou tissus critiques.

(27) Dans le cas d'une irradiation à peu près uniforme de *tout l'organisme*, les tissus critiques sont les tissus les plus radiosensibles, compte tenu de leur faculté à assumer des fonctions essentielles pour l'organisme dans son ensemble. Dans ce rapport, seront considérés comme tels les organes hématopoiétiques, les gonades et les cristallins. Dans les rapports précédents, la peau était considérée comme un organe critique en cas d'exposition de l'organisme entier. Dans le rapport ci-dessous, les recommandations ont été

présentées sous une forme simplifiée en excluant la peau des organes critiques.

(28) Dans le cas d'une irradiation plus ou moins limitée à certaines *parties de l'organisme*, les tissus critiques sont ceux pour lesquels la probabilité de subir un dommage permanent est la plus grande soit du fait de leur radiosensibilité propre, soit du fait d'une combinaison de la radiosensibilité avec une dose élevée au tissu considéré.

DOSE ADMISSIBLE

(29) Toute modification du milieu dans lequel l'homme s'est développé peut entraîner l'apparition d'effets nocifs. C'est pourquoi on admet qu'une exposition prolongée à des rayonnements ionisants, venant s'ajouter à l'irradiation naturelle, implique certains risques. Cependant, l'homme ne peut s'abstenir entièrement d'utiliser les rayonnements ionisants. En pratique, le problème consiste donc à limiter la dose de rayonnement de telle sorte que le risque créé soit acceptable pour l'individu et pour la population. Cette dose est appelée « dose admissible ».

(30) La dose admissible pour un *individu* est celle qui, accumulée pendant une longue période ou reçue au cours d'une exposition unique, entraîne, dans l'état actuel de nos connaissances, une probabilité négligeable de dommages somatiques ou génétiques graves ; de plus, elle est telle que les effets qui en résultent plus couramment sont limités à ceux, de nature bénigne, qui pourraient être jugés acceptables par l'individu exposé et par les autorités médicales compétentes.

(31) Tout dommage somatique grave (leucémie par exemple) qui pourrait résulter de l'exposition d'un certain nombre d'individus à la dose admissible, n'affecterait qu'une fraction extrêmement réduite du groupe exposé ; les effets tels que la réduction de la durée de vie, auxquels on pourrait s'attendre plus fréquemment, seraient très peu sensibles et probablement masqués par les variations biologiques normales. On peut donc s'attendre à ce que les doses admissibles produisent des effets décelables uniquement par des méthodes statistiques appliquées à des groupes importants.

(32) La dose-gonades admissible *pour la population tout entière* est déterminée en premier lieu

par des considérations d'ordre génétique (cf. par. 58-65).

DIFFÉRENTS TYPES D'EXPOSITION

(33) Les présentes recommandations sont destinées à limiter non seulement les effets somatiques, mais aussi les effets génétiques ; il est donc nécessaire de réduire autant que possible la dose pour la population dans son ensemble au même titre que la dose individuelle. En général, on devra tenir compte des doses qui résultent de toutes les sources de rayonnements ionisants pour estimer le dommage biologique possible. Cependant, pour des raisons pratiques, on est amené à considérer à part les doses qui résultent de deux types d'exposition, à savoir :

(a) l'exposition aux sources naturelles de rayonnement.

(b) l'exposition résultant de l'utilisation des rayonnements à des fins médicales.

(34) L'irradiation naturelle varie considérablement d'une région à l'autre et les doses qui en résultent au niveau des différents organes sont mal connues. Si l'irradiation naturelle était comprise dans les doses recommandées par la Commission comme limites maximales admissibles, la contribution que l'on pourrait admettre pour les sources artificielles — qui sont les seules sur lesquelles on puisse agir — serait mal définie et devrait varier d'une région à l'autre. Les doses qui résultent de l'irradiation naturelle sont donc exclues de toutes les doses maximales admissibles recommandées dans ce rapport.

(35) Dans la pratique médicale, l'exposition du malade au rayonnement primaire est généralement limitée à certaines parties de l'organisme, mais l'ensemble du corps est, dans une certaine mesure, exposé au rayonnement diffusé. Il est actuellement impossible d'évaluer les doses reçues par les différents organes et de préciser leur rôle dans l'ensemble des effets observés chez l'individu exposé. La Commission insiste spécialement sur l'importance des doses reçues par les *gonades* à la suite d'une exposition médicale et sur le risque génétique qui en résulte pour la population. En conséquence, elle recommande que, lors de l'utilisation des rayonnements ionisants, le Corps médical apporte le plus grand soin à réduire la dose-gonades reçue par les individus avant la fin de la période de fécondité à la valeur minimale compatible avec les exi-

gences médicales. Cependant, les doses individuelles liées à l'irradiation médicale sont exclues de toutes les doses maximales admissibles recommandées dans ce rapport.

(36) Les recommandations concernent les différents types d'exposition énumérés ci-dessous. En principe, il faut considérer aussi bien l'exposition *individuelle* que les moyennes établies sur l'ensemble de la *population*. Cependant les recommandations relatives à l'exposition individuelle n'ont été formulées que pour les catégories A et B.

A. *Exposition professionnelle*.

B. *Exposition de groupes particuliers* :

(a) Adultes travaillant à proximité de zones contrôlées (voir paragraphes 71 et 72), mais dont le travail n'implique pas en soi une exposition aux rayonnements.

(b) Adultes qui, pour raisons de service, pénètrent occasionnellement dans des zones contrôlées, mais ne sont pas considérés comme travailleurs professionnellement exposés.

(c) Individus du public habitant au voisinage de zones contrôlées.

C. *Exposition du public*

D. *Exposition à des fins médicales*

Exposition professionnelle

(37) L'exposition d'un *individu* qui travaille habituellement dans une zone contrôlée constitue une exposition professionnelle. Des doses maximales admissibles sont établies pour les individus formant la petite fraction de la population susceptible d'être professionnellement exposée (par. 46-52). La contribution de ce groupe à la dose génétique pour l'ensemble de la *population* est étudiée au paragraphe 65.

Exposition de groupes particuliers

(38) Les personnes qui ne pénètrent qu'occasionnellement dans une zone contrôlée et celles qui travaillent ou résident dans le voisinage d'une zone contrôlée peuvent être exposées à des rayonnements provenant de la dite zone. Elles forment des groupes qui peuvent comprendre des enfants et des femmes enceintes ainsi que des individus soumis à d'autres risques, et peuvent constituer au total une fraction importante de la population tout entière. C'est pourquoi, la dose maximale admissible pour ces personnes considérées *individuellement* a été fixée à une valeur inférieure à celle admise pour les

personnes exposées professionnellement (par. 53-57). La contribution de ces groupes à la dose génétique pour la *population tout entière* est étudiée au paragraphe 65.

Exposition du public

(39) Des individus appartenant au public peuvent être exposés à des rayonnements qui n'ont aucun rapport avec une zone contrôlée proprement dite ; par exemple, exposition résultant d'une contamination ambiante ou de sources de rayonnement très répandues telles que montres-bracelets, postes de télévision et différentes utilisations des substances radioactives consécutives au développement de l'énergie atomique. Comme cette exposition n'est pas facilement contrôlable, il sera impossible de s'assurer que la dose maximale admissible individuelle n'est pas dépassée dans certains cas particuliers. Lorsqu'il s'agit d'un grand nombre de personnes, il est impossible d'examiner les habitudes de chaque individu. Une procédure raisonnable consisterait à étudier un échantillon du groupe en question et à fixer le niveau d'irradiation dans le milieu ambiant de telle sorte qu'aucun individu appartenant à l'échantillon ne reçoive une dose excessive. Il sera toujours possible que certains individus, dont les habitudes diffèrent nettement de celles des personnes appartenant à l'échantillon observé, reçoivent une dose supérieure à la dose maximale établie pour l'échantillon.

(40) Pour faciliter l'établissement de plans en vue du développement futur des applications de l'énergie nucléaire et des autres sources de rayonnements, il est actuellement souhaitable de recommander un maximum pour la dose génétique applicable à la *population* (par. 64) ; ce maximum déterminera la valeur moyenne acceptable pour la dose-gonades. Une fraction de la dose génétique maximale recommandée devra être attribuée à l'exposition de groupes tels que (A) et (B) et à l'irradiation médicale. La part réservée à l'exposition du public doit tenir compte à la fois de l'irradiation interne et de l'irradiation externe (par. 65).

Exposition à des fins médicales

(41) Aucune recommandation concernant la dose pour l'individu dans le cas d'irradiation médicale n'a été formulée. (La contribution de l'irradiation médicale à la dose génétique est discutée aux paragraphes 69-70).

RÉDUCTION DE LA DOSE MAXIMALE ADMISSIBLE

(42) Les nouvelles recommandations ont été formulées en partie dans l'intention de limiter l'irradiation génétiquement significative de la population (voir par. 63) et, en partie, pour limiter la probabilité de dommage somatique grâce à une réduction de la dose reçue au cours de la vie. Cette réduction n'est pas liée à l'apparition évidente de troubles résultant de l'application des anciennes valeurs des doses admissibles, mais repose plutôt sur l'idée que la restauration biologique peut être réduite pour des doses aussi faibles.

INTERVALLES DE TEMPS AUXQUELS SONT RAPPORTÉES LES DOSES RECOMMANDÉES

(43) Les doses hebdomadaires maximales admissibles recommandées par la Commission en 1950 ont été remplacées par des limites pour les doses reçues en des temps plus longs (par. 47-

49). En cas d'exposition professionnelle, la dose maximale admissible qui peut être accumulée à un moment donné dépend de l'âge du travailleur. Pour les individus appartenant au public ou à des groupes particuliers, à l'exclusion des professionnels, la dose peut être accumulée à un rythme qui est déterminé par une dose maximale admissible annuelle. La dose génétique pour la population tout entière est établie pour la période comprise entre la conception de l'individu et la conception de chacun de ses enfants (pour la méthode d'évaluation, voir le paragraphe 63).

(44) Cette augmentation des périodes de temps sur lesquelles la dose est évaluée permet une certaine souplesse dans la manière dont l'irradiation peut être reçue et, en même temps, assure une protection que l'on peut considérer comme appropriée à chaque groupe de la population.

C. DOSES MAXIMALES ADMISSIBLES

GÉNÉRALITÉS

(45) Il faut insister sur le fait que les doses maximales admissibles recommandées dans ce chapitre sont des valeurs *maximales* : la Commis-

sion recommande de maintenir toutes les doses à des valeurs aussi faibles que possible et d'éviter toute exposition inutile.

EXPOSITION INDIVIDUELLE

EXPOSITION PROFESSIONNELLE

(46) La dose *totale* reçue par tout organe ou tissu du fait de l'exposition professionnelle doit comprendre la dose due à l'irradiation à partir de sources externes durant les heures de travail et la dose reçue à partir de sources internes qui ont pu s'introduire dans l'organisme au cours des heures de travail. Ni l'irradiation à des fins médicales, ni l'irradiation naturelle ne doivent être comprises dans cette dose.

Exposition des gonades, des organes hématopoïétiques et des cristallins

(47) La dose totale maximale admissible accumulée au niveau des gonades, des organes hématopoïétiques et des cristallins, à tout âge au-dessus de 18 ans, sera régie par la relation

$$D = 5 (N - 18)$$

où D est la dose tissulaire en rems et N l'âge en années.

(48) Pour les personnes professionnellement exposées à un débit constant de rayonnement à partir de l'âge de 18 ans, la formule implique une dose hebdomadaire maximale de 0,1 rem. Il est recommandé d'utiliser cette valeur pour l'élaboration des plans et des projets.

Rythme d'accumulation des doses

(49) Dans les limites établies par la formule, une personne exposée professionnellement peut accumuler la dose maximale admissible à un rythme qui ne dépasse pas 3 rems dans toute période de 13 semaines consécutives (autrement dit, quelles que soient les 13 semaines consécutives considérées, la dose reçue pendant cette période ne doit jamais dépasser 3 rems). En

cas de besoin, les 3 rems peuvent être reçus en une dose unique, mais comme nos connaissances scientifiques sur les effets biologiques de débits de dose différents sont insuffisantes, il faut éviter dans toute la mesure du possible les doses uniques de l'ordre de 3 rems.

Application à des cas particuliers

(50) La fixation de limites admissibles d'exposition sous forme de dose accumulée jusqu'à un âge donné, amène quelques complications d'ordre pratique. Ainsi, certains travailleurs (exposés antérieurement à des doses comprises dans les limites admissibles) peuvent avoir déjà accumulé une dose supérieure au maximum déterminé par la formule. Il existe également certains cas particuliers dans lesquels, pour des raisons d'ordre pratique, des exceptions à l'application de la formule seraient souhaitables et peuvent se justifier dans le contexte du paragraphe 42. Les recommandations ci-dessous sont données à titre d'indication pour les dispositions administratives qui peuvent varier selon les circonstances sur le plan local. (Il convient de noter que cette situation ne prévaudra que pendant une période de transition relativement courte).

(51a) *Exposition antérieure inconnue.* Lorsqu'on ne connaît pas avec précision l'exposition professionnelle à laquelle un travailleur a pu être antérieurement soumis, il faut admettre qu'il a déjà reçu la dose totale permise par la formule.

(51b) *Personnes exposées lors de l'application de l'ancienne dose maximale admissible hebdomadaire.* Les personnes qui ont été exposées conformément à la dose hebdomadaire maximale de 0,3 rem, admise jusqu'à maintenant, et qui ont accumulé une dose supérieure à celle permise par la formule actuelle, ne doivent pas être exposées à une intensité supérieure à 5 rems par an jusqu'à ce que la dose accumulée soit inférieure, à un moment ultérieur, à celle permise par la formule.

(51c) *Personnes qui commencent à travailler avant l'âge de 18 ans.* Lorsqu'une personne commence à être professionnellement exposée avant l'âge de 18 ans, la dose ne doit jamais dépasser 5 rems par an avant 18 ans et la dose accumulée à l'âge de 30 ans ne doit pas dépasser 60 rems. (L'âge minimal auquel l'exposition profession-

nelle est autorisée par la loi est inférieur à 18 ans dans quelques pays).

(51d) *Exposition accidentelle élevée.* Une irradiation accidentelle élevée, unique au cours de la vie et n'excédant pas 25 rems, doit être ajoutée à la dose professionnelle accumulée jusqu'au moment de l'accident. Si le total dépasse alors la valeur maximale permise par la formule, l'excès ne doit pas être nécessairement compris dans les calculs futurs de la dose accumulée par la personne. Une exposition accidentelle à des doses dépassant 25 rems doit être considérée comme potentiellement grave; le cas sera soumis aux autorités médicales compétentes qui interviendront de façon appropriée et recommanderont une ligne de conduite en ce qui concerne l'exposition professionnelle ultérieure. Il s'agit là d'une règle administrative établie pour permettre la continuation du travail sous rayonnements, à la suite d'un accident bona fide (« unique au cours de la vie »), au cas où l'interruption de ce travail ou une réduction de l'exposition handicaperait l'individu dans la poursuite de sa carrière.

(51e) *Exposition exceptionnelle.* Un travail indispensable et exceptionnel qui implique une exposition dépassant les limites admissibles sera organisé de telle sorte que le travailleur ne reçoive pas une dose supérieure à 12 rems. Celle-ci sera ajoutée à la dose professionnelle accumulée jusqu'au moment de cette exposition exceptionnelle. Si le total dépasse alors la valeur maximale admise par la formule, l'excès doit être compensé par une réduction du taux d'exposition ultérieur de telle sorte que, dans une période ne dépassant pas 5 ans, la dose accumulée soit de nouveau en accord avec la limite prescrite par la formule. Les femmes en âge de procréer ne doivent pas être soumises à des expositions exceptionnelles de ce genre.

Exposition d'organes déterminés autres que les gonades, les organes hématopoïétiques et les cristallins.

(52) En ce qui concerne l'exposition strictement limitée à certaines parties de l'organisme ou à un seul organe, à l'exception des gonades, des organes hématopoïétiques et des cristallins, on admet une dose supérieure à celle qui découle de la formule $D = 5(N - 18)$. Les recommandations suivantes sont faites.

(52a) *Dose maximale de 8 rems/13 semaines au niveau de la peau**. Les doses maximales hebdomadaires recommandées antérieurement pour l'exposition de la peau, à savoir 0,6 rem dans le cas d'une exposition totale de l'organisme et 1,5 rem dans le cas d'exposition à des rayonnements de très faible pouvoir de pénétration, ont été remplacées par la recommandation suivante : la dose à la peau, accumulée dans toute période de 13 semaines consécutives, ne doit pas dépasser 8 rems. Cette nouvelle recommandation s'applique à toute exposition de la peau, à l'exception de la peau des mains et des avant-bras, des pieds et des chevilles. La valeur de 8 rems étant obtenue à partir d'une moyenne de 0,6 rem/semaine, la dose annuelle, pour une année de 50 semaines, est limitée à 30 rems.

(52b) *Dose maximale de 20 rems/13 semaines pour les mains et les avant-bras, les pieds et les chevilles*. La dose maximale hebdomadaire antérieurement recommandée de 1,5 rem pour l'exposition des mains et des avant-bras, des pieds et des chevilles, a été remplacée par la recommandation suivante : la dose accumulée dans toute période de 13 semaines consécutives ne doit pas dépasser 20 rems. Cette recommandation s'applique à tous les tissus des extrémités mentionnées ci-dessus. Comme la dose de 20 rems a été obtenue à partir d'une moyenne de 1,5 rem/semaine, la dose annuelle, pour une année de 50 semaines, est limitée à 75 rems.

(52c) *Dose maximale de 4 rems/13 semaines pour une irradiation limitée à des organes internes autres que la thyroïde, les gonades et les organes hématopoïétiques*. Dans le cas des organes internes, l'irradiation partielle est due presque exclusivement à des radioisotopes introduits dans l'organisme. Comme la plupart des dispositions prises pour le rejet d'isotopes radioactifs dans l'air et dans l'eau à l'intérieur des zones contrôlées, sont élaborées en se plaçant dans les conditions d'exposition collective professionnelle plutôt que dans les conditions d'exposition individuelle, on ne peut généralement pas appliquer pour l'irradiation interne une formule analogue à celle du paragraphe 47. On admet que, dans les conditions d'équilibre, la dose moyenne délivrée à un organe donné (à quelques exceptions près, indiquées

dans le rapport du Comité II) est de 0,3 rem/semaine, si la concentration dans l'air ou dans l'eau de l'isotope considéré est maintenue aux valeurs données dans les tableaux du rapport du Comité II. Des variations du débit de dose se produiront dans la pratique ; elles pourront être tolérées à condition que la dose accumulée dans toute période de 13 semaines consécutives ne dépasse pas 4 rems. Comme ce maximum découle d'une moyenne hebdomadaire de 0,3 rem, la dose annuelle, pour une année de 50 semaines, est limitée à 15 rems.

(52d) *Exposition totale de l'organisme par suite de l'absorption de plusieurs radioisotopes*. Lorsqu'il s'agit d'un mélange de radioisotopes dont les constituants sont fixés par divers organes et que les doses tissulaires ainsi délivrées à ces organes sont du même ordre de grandeur, on admet que l'irradiation combinée qui en résulte constitue pratiquement une exposition totale de l'organisme. C'est pourquoi les limites maximales admissibles d'exposition doivent être celles qui ont été fixées pour les gonades, les organes hématopoïétiques et les cristallins.

EXPOSITION DE GROUPES PARTICULIERS

(53) La dose individuelle totale maximale admissible est la somme des doses qui proviennent des sources externes et internes. Elle ne doit pas inclure les doses qui résultent de l'exposition à des fins médicales ou de l'irradiation naturelle.

Dose annuelle totale au niveau des gonades, des organes hématopoïétiques et des cristallins.

(54) Pour tout individu des groupes B (a) et B (b) (voir paragraphe 36), la dose annuelle totale au niveau des gonades, des organes hématopoïétiques et des cristallins, comprenant à la fois l'irradiation externe et l'irradiation interne et résultant d'opérations effectuées à l'intérieur de zones contrôlées, ne doit pas dépasser 1,5 rem ; de même, la contribution d'un mélange de radioisotopes dont l'irradiation combinée constitue essentiellement une exposition totale de l'organisme, ne doit pas amener la dose annuelle totale à dépasser 1,5 rem. On fait cependant une exception dans le cas de la peau et de la thyroïde, pour lesquelles on admet un maximum annuel de 3 rems.

(55) Le groupe B (c) diffère des groupes B (a) et B (b) par le fait qu'il comprend des enfants

* Cette recommandation s'applique également à la thyroïde, voir rapport du Comité II.

pour lesquels on estime qu'il faudrait appliquer un chiffre plus faible, à savoir 0,5 rem/an au niveau des gonades, des organes hématopoïétiques et des cristallins. Aussi, la présence d'enfants dans le groupe B (c) obligera à adopter, pour ce groupe, une valeur de 0,5 rem/an lors de l'élaboration des plans et des projets d'installations.

Irradiation interne d'un seul organe

(56) La dose annuelle maximale admissible individuelle ne sera pas dépassée du fait de l'irradiation interne d'un organe quelconque, si le plan de rejet des substances radioactives est conçu sur la base de 1/10 de la concentration maximale admissible (CMA) dans l'air ou dans l'eau, donnée pour l'exposition professionnelle continue (« semaine de 168 heures ») dans les tableaux du rapport du Comité II.

Irradiation totale de l'organisme par suite de l'absorption de plusieurs radioisotopes, dans le cas du groupe B (c)

(57) Quand les divers constituants d'un mélange de radioisotopes se fixent dans plusieurs

organes de telle sorte que l'irradiation résultante constitue essentiellement une irradiation totale de l'organisme, il faut réduire les concentrations maximales admissibles qui ont été établies pour l'irradiation d'organes pris isolément (voir rapport du Comité II). Cette réduction doit tenir compte du nombre et de l'importance des organes fixant les radioéléments, ainsi que de la contribution à l'exposition totale de l'organisme qu'apportent les substances radioactives présentes dans le sang circulant et dans les organes autres que ceux dans lesquels on admet qu'ils se concentrent électivement. Dans ce cas, c'est l'organisme entier qui constitue l'organe critique et les CMA pour les différents radioisotopes sont réduites de telle manière que la CMA pour le mélange corresponde à une dose annuelle moyenne de 0,5 rem pour l'organisme entier. Pour de tels mélanges de radioisotopes, cela revient à réduire les valeurs des CMA de chacun des constituants du mélange, en leur appliquant un facteur égal ou inférieur à 1/3 en plus du facteur 1/10 recommandé au paragraphe 56.

EXPOSITION DE LA POPULATION

GÉNÉRALITÉS

(58) Une planification convenable pour l'élaboration des projets de centrales nucléaires et l'utilisation pacifique de l'énergie atomique sur une large échelle, exige que l'exposition de l'ensemble de la population soit limitée, d'une part en fixant un maximum pour les doses individuelles et d'autre part en limitant le nombre de personnes exposées.

(59) Cette limitation implique nécessairement un compromis entre les effets défavorables des rayonnements et les avantages que la société peut en retirer. Les considérations d'ordre génétique jouent un rôle dominant dans l'évaluation de cette limite. Le problème a été très discuté au cours des dernières années et différents organismes nationaux ont fait des suggestions. La Commission est consciente du fait qu'on ne peut encore dresser un bilan exact des risques et des avantages, car il faudrait pour cela une appréciation quantitative des dommages biologiques éventuels et des avantages probables, qui ne peut être faite actuellement. De plus, il faut

noter que les facteurs qui influent sur l'équilibre entre les risques et les avantages, varient d'un pays à l'autre et que la décision finale doit être prise par chaque pays.

(60) Comme il est urgent de donner des indications à ce sujet, la Commission propose, dans les paragraphes suivants, une limite supérieure provisoire pour l'exposition de l'ensemble de la population. La valeur proposée est essentiellement en accord avec les suggestions faites par d'autres groupes scientifiques qui ont étudié le problème et qui ont cherché à évaluer les effets biologiques éventuels. Cette valeur laisse, semble-t-il, une marge raisonnable pour l'extension des programmes d'énergie atomique dans un proche avenir. Il convient de souligner que, pour les raisons ci-dessus mentionnées, cette limite peut ne pas définir en fait, de façon convenable, l'équilibre entre les effets nocifs éventuels et les avantages probables.

(61) En supposant qu'il existe une relation linéaire entre les effets génétiques et la dose-

gonades et qu'il n'y a pas de dose seuil, on peut déterminer une dose population moyenne tenant compte du dommage génétique pour la population tout entière (paragraphe 62-63). Dans le cas des effets somatiques, il est difficile de définir une telle dose, bien que la dose annuelle per capita au niveau de certains tissus ou de l'organisme entier pourrait être pertinente dans l'hypothèse d'une relation linéaire sans seuil entre la dose et l'effet.

DOSE GÉNÉTIQUE

Évaluation de la dose génétique

(62) La dose génétique pour une population est la dose qui, si elle était reçue par chaque individu dans la période comprise entre la conception et l'âge moyen de procréation, entraînerait pour l'ensemble de la population le même fardeau génétique que les doses effectivement reçues par les individus. La dose génétique admissible est la dose qui, si elle était reçue par chaque individu dans la période comprise entre la conception et l'âge moyen de procréation, entraînerait pour la population tout entière une charge acceptable.

(63) La dose génétique pour une population peut être calculée en multipliant la dose annuelle génétiquement significative par l'âge moyen de procréation qui, dans le cadre de ces recommandations, est fixé à 30 ans. La dose annuelle génétiquement significative pour une population est la moyenne des doses-gonades individuelles, chacune de ces doses étant pondérée par la probabilité du nombre d'enfants qui peuvent être conçus après l'exposition.

Dose génétique maximale admissible

(64) On propose que la dose génétique (voir paragraphe 63) pour la population tout entière, à partir de toutes les sources autres que la radioactivité naturelle, ne dépasse pas 5 rems auxquels vient s'ajouter l'irradiation à des fins médicales qui doit être maintenue au niveau le plus bas possible. La dose due à la radioactivité naturelle n'est pas comprise dans la valeur proposée car elle varie beaucoup d'un pays à l'autre. C'est également l'une des raisons pour lesquelles la dose qui résulte de l'exposition à des fins médicales est considérée séparément, l'autre raison étant qu'on s'efforce de limiter

cette exposition à la valeur minimale compatible avec les exigences médicales.

Répartition de la dose génétique

(65) La dose génétique maximale proposée de 5 rems, qui s'ajoute à la dose due à l'irradiation à des fins médicales et à l'irradiation naturelle, ne doit pas être épuisée par un seul type d'exposition. La répartition appropriée de la dose totale dépendra de conditions qui peuvent varier d'un pays à l'autre ; la décision devra donc être prise par les autorités nationales.

Addendum au paragraphe 65

(a) *Exemple de répartition.* La Commission ne tient pas à faire de recommandations fermes en ce qui concerne la répartition de la dose génétique de 5 rems ; mais, à titre d'indication, elle donne la répartition ci-dessous pour illustrer ce qui vient d'être dit.

(A) Exposition professionnelle	1,0 rem
(B) Exposition de groupes particuliers	0,5 rem
(C) Exposition du public	2,0 rems
Réserve	1,5 rem

(b) *Fractions de la population.* En supposant que le rapport de la population totale à la population en âge de procréer est le même dans tous les groupes, la fraction la plus grande (ϵ) de la population tout entière qui peut être exposée à une dose annuelle moyenne $\bar{D}_1^i$ est donnée par l'équation :

$$\epsilon \cdot 30 \cdot \bar{D}_1^i = D_{30}^i$$

où D_{30}^i est la fraction de la dose génétique pour le groupe d'exposition d'ordre i ; la dose annuelle moyenne dans ce groupe peut être exprimée comme une fraction de la dose annuelle maximale admissible individuelle, c'est-à-dire : $\bar{D}_1^i = F_1 D_1^i$.

(c) *Exposition professionnelle.* Assigner 1,0 rem pour l'exposition professionnelle signifierait que 0,7 % de la population tout entière pourrait accumuler la dose-gonades maximale admissible pour les personnes professionnellement exposées, soit 60 rems à l'âge de 30 ans. Il est très peu probable que ce pourcentage soit atteint dans un proche avenir. Actuellement, le nombre de personnes professionnellement exposées dans les pays développés au point de vue technique, représente environ 0,1 à 0,2 % de la population et la plupart de ces personnes reçoivent des doses

très sensiblement inférieures aux doses maximales admissibles.

(d) *Exposition de groupes particuliers.* Comme la contribution des groupes particuliers à la dose génétique est due pour une grande part au groupe B (c), une attribution de 0,5 rem pour l'exposition des groupes particuliers impliquerait que 3 % de la population tout entière pourraient être exposés aux doses-gonades maximales admissibles par individu et par an, indiquées pour ces groupes. Le nombre de personnes que l'on peut admettre dans ces groupes varie en raison inverse de la dose moyenne au sein de ces groupes. Ainsi, si cette dose était seulement égale à 10 % des doses maximales individuelles, les groupes pourraient atteindre 30 % de la population tout entière, ce qui dépasse largement les prévisions.

(e) *Exposition du public.* La fraction de 2,0 rems (avec une réserve à long terme de 1,5 rem pour parer à toute éventualité), assignée pour la dose génétique du public, est donnée pour l'élaboration des plans lors de la réalisation des programmes d'énergie nucléaire (y compris les problèmes de rejet d'effluents qui y sont associés) et en vue d'une utilisation plus large des sources de rayonnements. En cas d'irradiation interne, les radioisotopes les plus importants sont ceux qui contribuent à la dose-gonades soit directement (par concentration locale), soit indirectement (du fait du rayonnement émis en un autre point de l'organisme). Dans les deux cas, les valeurs recommandées par le Comité II comme concentrations maximales admissibles de ces isotopes dans l'air et dans l'eau pour l'exposition professionnelle continue (« semaine de 168 heures »), sont déterminées sur la base d'une dose annuelle moyenne de 5 rems au niveau des gonades ou pour l'organisme entier. Si les concentrations moyennes de ces isotopes dans l'air et dans l'eau potable sont égales au 1/100 des valeurs données pour l'exposition professionnelle continue, la dose génétique pour la population s'élèvera à 1,5 rem ($5 \times 1/100$ rems/an au niveau des gonades $\times 30$ ans = 1,5 rem). Dans ce cas la contribution due aux sources externes devrait être limitée à 0,5 rem, afin que le total ne dépasse pas 2 rems.

DOSE SOMATIQUE

(66) Il n'y a pas, pour le moment, de recom-

mandation spécifique concernant une dose maximale admissible « somatique » pour la population. Cependant, on pense que les limites maximales admissibles recommandées dans les paragraphes 46-57 pour les doses *individuelles* accumulées, maintiendront la dose moyenne au niveau de n'importe quel tissu à une valeur telle que les dommages qui pourraient en résulter au sein d'une population seraient compris dans des limites tout à fait acceptables (voir paragraphe 31).

(67) Dans le cas d'irradiation externe de l'organisme entier par des rayonnements pénétrants, la limitation imposée par l'existence d'une dose génétique pour la population réduit automatiquement les doses délivrées aux organes internes à des valeurs inférieures aux doses annuelles maximales admissibles *individuelles* recommandées aux paragraphes 46-57. Ainsi, la probabilité de dommage somatique dans ces organes est sensiblement plus faible que cela n'était indiqué au paragraphe 66. Il en est de même pour l'irradiation interne due à des radioisotopes qui contribuent soit directement, soit indirectement à la dose-gonades d'une population. (Voir addendum au paragraphe 65).

(68) Il reste encore à étudier plus en détail les isotopes qui se concentrent dans des organes spécifiques (autres que les gonades). En raison de l'incertitude qui existe à propos de la relation dose-effet dans le cas des effets somatiques, on propose la règle suivante : lors de l'élaboration des projets d'installations, les concentrations moyennes de ces isotopes ou de leurs mélanges dans l'air ou dans l'eau, qu'il convient d'appliquer au public, ne devraient pas dépasser 1/30^e des CMA données dans le rapport du Comité II pour une exposition professionnelle continue.

EXPOSITION À DES FINS MÉDICALES

(69) Dans un rapport destiné au Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des radiations ionisantes, un groupe d'études, comprenant des représentants de la C.I.P.R. et de la C.I.U.R., s'est efforcé d'évaluer la dose annuelle génétiquement significative due aux techniques médicales dans différents pays. Dans son rapport de 1958 à l'Assemblée générale, le Comité scientifique des Nations Unies en donne le résumé suivant :

« La contribution des techniques médicales à l'irradiation des populations n'a été évaluée que récemment. Elle a augmenté très rapidement dans quelques pays au cours des dernières années, si bien qu'il est difficile d'apprécier exactement les effets génétiques et somatiques associés à l'utilisation accrue des techniques radiologiques en médecine. Aucune information ne permet encore de prévoir l'évolution future des irradiations à des fins médicales. On pense que le perfectionnement de l'équipement et des techniques peut réduire considérablement l'exposition individuelle, mais il se pourrait que l'emploi sans cesse croissant des rayons X augmente la dose reçue par la population du monde entier. Des précautions semblables à celles décrites par la Commission Internationale de Protection Radiologique et la Commission Internationale des Unités et Mesures Radiologiques devraient permettre de diminuer l'exposition aux rayonnements sans réduire la valeur médicale de ces techniques ».

(70) Les valeurs obtenues dans divers pays pour la dose annuelle génétiquement significative, s'échelonnent jusqu'à environ 150 mrem,

ce qui correspond à une dose génétique de 4,5 rem (depuis la conception jusqu'à l'âge de 30 ans, en moyenne sur la population tout entière). Même si l'on retient les valeurs les plus élevées (correspondant à une dose génétique de 4,5 rem), la dose génétique totale, résultant de l'ensemble des sources de rayonnements, ne dépassera pas 10 rem, si la limite fixée pour la contribution des sources d'irradiation autres que les sources médicales n'est pas dépassée. Il semble que les doses les plus élevées résultant des utilisations médicales pourraient être sensiblement réduites en apportant une attention spéciale à la mise en œuvre des techniques. D'autre part, l'emploi des rayons X peut se développer : cependant ce développement sera sans doute moins important dans les pays où leur utilisation est actuellement la plus répandue. On doit et on peut admettre, dans l'avenir immédiat, une certaine tolérance en ce qui concerne l'irradiation des populations à des fins médicales puisqu'on cherche encore à limiter cette irradiation à la valeur minimale compatible avec les exigences médicales.

D. PRINCIPES GENERAUX CONCERNANT LES CONDITIONS DE TRAVAIL

RESPONSABILITÉ

La personne à qui appartient l'entreprise ou qui dirige la zone contrôlée doit être responsable des conditions de travail et de l'éducation de toutes les personnes travaillant dans cette zone en ce qui concerne les dangers des radiations et les méthodes de contrôle. Elle doit être responsable du maintien, à l'extérieur de la zone contrôlée, des niveaux de rayonnement qui résultent d'opérations effectuées à l'intérieur de cette zone, à une valeur telle que les doses maximales admissibles recommandées aux paragraphes 53-57 ne soient pas dépassées.

(71) Une zone contrôlée doit être établie là où des personnes professionnellement exposées pourraient recevoir des doses supérieures à 1,5 rem/an.

(72) Une zone contrôlée est une zone où l'exposition du personnel aux rayonnements ou aux substances radioactives est placée sous la surveillance d'une personne responsable de la protection radiologique.

(73) Le responsable de la protection radiologique doit connaître les consignes appropriées de protection contre les rayonnements et avoir la responsabilité de les appliquer. Il peut s'agir de la personne à qui appartient l'entreprise ou de la personne qui dirige la zone contrôlée, ou encore d'un agent techniquement compétent désigné par ces dernières.

(74) Un expert qualifié (ou ingénieur sanitaire) est une personne ayant les connaissances et la formation nécessaires pour mesurer les rayonnements ionisants et pour donner des conseils en matière de protection radiologique. Les titres requis doivent être spécifiés par un comité national.

SURVEILLANCE ET CONTRÔLE DES RAYONNEMENTS

Enquêtes précédant la mise en service de zones contrôlées

(76) Dans le cas où les opérations effectuées au sein d'une zone contrôlée peuvent perturber ou modifier de façon sensible le milieu ambiant,

en ce qui concerne les dangers d'irradiation, il faut procéder à un contrôle approprié de la radioactivité de l'air, du sol et de l'eau avant le début des opérations. On obtiendra ainsi une base pour juger de l'efficacité du contrôle des rayonnements à l'intérieur de la zone.

(77) Au cours de l'installation et par la suite, un contrôle approprié des rayonnements permettra de s'assurer que les recommandations pertinentes seront observées lorsque débiteront les activités de routine. Celles-ci seront différées jusqu'à ce que les conditions soient conformes aux recommandations.

(78) Lorsqu'on projette d'effectuer des opérations nouvelles dans la zone contrôlée, un contrôle minutieux de la radioactivité ambiante doit être effectué avant le début des nouvelles opérations. On pourra ainsi identifier plus facilement l'origine d'un accroissement de la radioactivité ambiante ou bien de la contamination de la zone.

Surveillance et contrôle de routine

(79) Pour s'assurer de l'efficacité des mesures de sécurité, un contrôle des rayonnements sera pratiqué régulièrement : sa fréquence sera dictée par la nature des opérations effectuées dans la zone contrôlée. Cette surveillance devra comprendre la vérification des installations, de l'équipement (signalisation, écrans, hottes, masques, système de ventilation, etc...) et des méthodes de travail. S'il existe une certaine probabilité de danger radioactif, le voisinage de la zone contrôlée doit être également surveillé.

Contrôles spéciaux

(80) Des recommandations spéciales et précises concernant le contrôle des rayonnements dans certains cas particuliers, seront données dans les rapports des Comités de la C.I.P.R.

SURVEILLANCE MÉDICALE

Examen d'embauche

(81) Tout personnel nouveau destiné à un travail comportant une exposition aux rayonnements doit subir un examen médical d'embauche. On prendra note des antécédents familiaux et professionnels, ainsi que des examens radiologiques ou de la radiothérapie subis antérieurement. L'examen comprendra : un examen hématologique complet avec numération globu-

laire (érythrocytes et leucocytes) et formule leucocytaire. Il faut remarquer que cet examen est destiné à déterminer l'état « normal » du travailleur au moment de l'embauche ; il a pour but, également, de mettre en évidence toute anomalie qui pourrait, par la suite, être confondue avec un dommage dû aux rayonnements.

(82) Dans les cas où existe une exposition professionnelle antérieure, la dose totale accumulée doit être enregistrée (voir paragraphes 47-51) et tout examen médical supplémentaire, jugé nécessaire, doit être pratiqué. En cas d'exposition aux neutrons et à des particules lourdes, on doit pratiquer des examens ophtalmologiques en recherchant particulièrement les modifications au niveau du cristallin ; en cas d'irradiation externe partielle ou de contamination externe, on pratiquera un examen de la peau et des ongles.

Examens médicaux de routine

(83) Des examens médicaux doivent être pratiqués à une fréquence qui dépend des conditions de l'exposition professionnelle. La formule sanguine, bien que faisant partie de l'examen médical, ne doit pas être considérée comme une méthode de contrôle de l'irradiation.

(84) Les personnes exposées professionnellement aux neutrons et aux particules lourdes de grand pouvoir de pénétration doivent subir des examens ophtalmologiques en vue, notamment, de déceler des modifications éventuelles du cristallin. La fréquence des examens dépendra des conditions de l'exposition.

CONTRÔLE DU PERSONNEL

Irradiation externe

(85) Les doses qui résultent de l'exposition professionnelle doivent être systématiquement contrôlées à l'aide d'instruments appropriés, pour vérifier que les doses maximales admissibles ne sont pas dépassées et pour permettre l'enregistrement des doses individuelles accumulées.

Irradiation interne

(86) Des analyses doivent être effectuées, pour évaluer la quantité totale de radioisotopes contenue dans l'organisme, chez les travailleurs qui utilisent les radioisotopes sous forme de sources non scellées, ce qui peut entraîner une ingestion ou une inhalation à des taux supérieurs aux

concentrations maximales admissibles. Ces analyses doivent également être pratiquées, lorsque les radioisotopes peuvent pénétrer dans l'organisme au travers de la peau ou par l'intermédiaire de piqûres et de blessures ouvertes. Ces analyses peuvent nécessiter, selon les circonstances, un contrôle de l'air expiré et des excréta, ainsi que la détermination directe de la quantité de radioisotopes dans l'organisme à l'aide d'un appareil mesurant la radioactivité totale du corps humain. Les doses de rayonnement délivrées à certains organes ou tissus doivent

être calculées et notées dans le dossier personnel du sujet exposé et les doses admissibles pour l'irradiation externe doivent être rectifiées pour tenir compte des doses « internes ».

SIGNALISATION

(87) Une forme appropriée de signalisation doit être prévue pour indiquer l'existence d'un danger radioactif, même si ce danger n'est que temporaire. Dans ce dernier cas, le dispositif de signalisation doit être retiré, lorsque le danger n'existe plus.

ADDENDUM A
LA PUBLICATION CIPR I (RECOMMANDATIONS DE 1958)

RAPPORT SUR LES DECISIONS PRISES LORS DE LA REUNION
DE 1959 DE LA COMMISSION INTERNATIONALE
DE PROTECTION RADIOLOGIQUE (CIPR)

INTRODUCTION

LA période qui s'est écoulée depuis la dernière réunion officielle de la Commission, en 1956, a été la période la plus active de son existence. En raison de l'évolution rapide dans le domaine de l'énergie nucléaire et de l'utilisation plus large des sources de rayonnement de tous genres, ses activités ont débordé le domaine de la radiologie médicale et se sont étendues à tous les domaines de la protection radiologique, y compris les utilisations industrielles et l'exposition du public.

En 1955, les Nations Unies ont institué un Comité Scientifique pour l'étude des effets des radiations ionisantes, chargé de rassembler des renseignements sur l'exposition aux rayonnements ainsi que sur les effets qui en résultent, et de les exploiter. De plus, des organismes tels que l'Organisation Mondiale de la Santé, le Bureau International du Travail, l'Organisation pour l'Alimentation et l'Agriculture et l'Agence Internationale de l'Energie Atomique, s'intéressent activement aux problèmes de protection contre les rayonnements et attendent des directives de la Commission Internationale de Protection Radiologique. Bien qu'à l'origine, la Commission n'ait eu sous sa responsabilité que les activités professionnelles dans le domaine de la radiologie, elle a dû élargir son champ d'action et, en conséquence, son activité s'est manifestée non seulement au cours des deux derniers Congrès internationaux de Radiologie, mais également dans la période intermédiaire.

Les amendements aux recommandations de 1953 [1] ont été exposés au Congrès de Mexico et publiés en 1957 [2]. Les recommandations révisées de la Commission principale ont été adoptées en 1958 et éditées au commencement de 1959 [3]. Les rapports des différents Comités

sont actuellement à divers stades de préparation. Le rapport du Comité II sur les substances radioactives dans l'organisme est déjà sous presse [4]. Une version révisée du rapport du Comité III qui constitue, essentiellement, un recueil de règles pratiques pour la profession radiologique, a été approuvée au cours de la réunion de 1959 et sera publiée dans un proche avenir [5]. Le rapport du Comité IV sur les rayonnements de haute énergie et les particules lourdes est en cours de révision définitive. Le Comité V a préparé un rapport sur l'élimination des déchets radioactifs provenant des hôpitaux et des laboratoires et cherche à préparer aussi rapidement que possible un autre rapport sur l'élimination des déchets provenant des établissements de l'Energie Atomique.

La Commission entretient des relations officielles avec l'Organisation Mondiale de la Santé et l'Agence Internationale de l'Energie Atomique. Elle a collaboré étroitement avec le Comité Scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des radiations ionisantes et, à la demande de ce dernier, la Commission a accepté, à deux reprises, de faire, en commun avec la Commission Internationale des Unités et Mesures Radiologiques, des études spéciales. Les résultats de la première étude sur l'évaluation de la dose-gonades résultant de l'utilisation des rayonnements à des fins médicales ont été publiés en 1957 [6]. La deuxième étude concernant l'évaluation de l'exposition aux rayonnements qui pourrait entraîner un dommage somatique, a été entreprise et un rapport doit être préparé avant la fin de 1960.

La Commission collabore également avec le Bureau International du Travail et l'Organisation pour l'Alimentation et l'Agriculture et les a invités à envoyer des observateurs à ses futures

réunions. La Commission elle-même a été invitée à envoyer des observateurs à certaines réunions de l'Organisation Internationale de Normalisation et de l'UNESCO.

Lors de la réunion de 1959, la Commission a discuté ses recommandations fondamentales [3] et bien qu'elle n'y ait pas apporté de modifications essentielles, un certain nombre d'éclaircissements ont été rédigés. Ces explications qui seront exposées dans le texte ci-dessous, comprennent des sujets tels que l'irradiation des femmes enceintes, les doses maximales pour des individus appartenant au public, l'interprétation à donner au paragraphe traitant de la contamination de l'eau potable et de l'air dans le domaine public, ainsi que les heures de travail et la durée des congés des travailleurs professionnellement exposés.

Grâce à une subvention de la Fondation Rockefeller, la Commission a pu inviter, aux discussions de Munich, certains spécialistes des relations dose-effet, étrangers à la Commission, et leur demander de rester à sa disposition pour des consultations éventuelles.

La composition de la CIPR lors de la préparation de cet addendum était la suivante :

1956-1959

(y compris les sessions de Munich)

R. M. SIEVERT, Président (Suède)
G. FAILLA, Vice-Président (E.U.)
W. BINKS, Secrétaire* (Grande-Bretagne)
L. BUGNARD (France)
H. HOLTHUSEN (Allemagne)
J. C. JACOBSEN (Danemark)
R. G. JAEGER (Allemagne)
W. V. MAYNEORD (Grande-Bretagne)
K. Z. MORGAN (E.U.)
R. S. STONE (E.U.)
L. S. TAYLOR (E.U.)
E. A. WATKINSON (Canada)
Sir Ernest ROCK CARLING, Président honoraire (Grande-Bretagne)

* M. BINKS démissionna de ses fonctions de Secrétaire en 1957 pour raisons de santé. Après cette démission, E. E. SMITH (G.B.) remplit les fonctions de Secrétaire intérimaire et depuis le 1^{er} août 1957, B. LINDELL (Suède) remplit les fonctions de Secrétaire temporaire.

1959-

(Composition actuelle)

R. M. SIEVERT, Président (Suède)
E. E. POCHIN, Vice-Président (Grande-Bretagne)
W. BINKS (Grande-Bretagne)
L. BUGNARD (France)
H. HOLTHUSEN (Allemagne)
J. C. JACOBSEN (Danemark)
R. G. JAEGER (Allemagne)
J. F. LOUTIT (Grande-Bretagne)
K. Z. MORGAN (E.U.)
H. J. MULLER (E.U.)
R. S. STONE (E.U.)
L. S. TAYLOR (E.U.)
E. A. WATKINSON (Canada)
Sir Ernest ROCK CARLING, Président honoraire (Grande-Bretagne)
G. FAILLA, Vice-Président honoraire (E.U.)
B. LINDELL, Secrétaire (Suède)

NOTES EXPLICATIVES ET AMENDEMENTS AUX RECOMMANDATIONS DE 1958

Dans les recommandations de 1958 [3], toutes les doses maximales admissibles sont exprimées en rems sans tenir compte des valeurs appropriées des EBR. Il en sera tenu compte dans les rapports des Comités qui traitent de l'application des recommandations dans divers domaines bien déterminés. Les valeurs EBR utilisées dans chacun des rapports qui doivent être publiés par les Comités, sont en accord avec les valeurs publiées en 1955 [1].

Les indications ci-dessous se rapportent à des paragraphes particuliers des recommandations de 1958 :

Note explicative se rapportant au paragraphe 46 (voir également paragraphes 35 et 41).

On a recommandé d'exclure « l'exposition à des fins médicales » du calcul de la dose maximale admissible pour les travailleurs professionnellement exposés. La Commission tient à souligner que le terme « exposition à des fins médicales » désigne l'exposition de *malades*, c'est-à-dire une exposition nécessaire du point de vue médical, et non l'exposition du personnel qui applique les techniques.

Interprétation du paragraphe 49 (voir également paragraphes 10, 14 et 52).

On peut utiliser le trimestre légal à la place d'une période de 13 semaines consécutives lorsqu'il n'y a aucune raison de supposer que les doses sont accumulées à un rythme très irrégulier.

Additif au paragraphe 49

Les termes suivants doivent être ajoutés à la fin du paragraphe — « en particulier dans le cas des femmes en âge de procréer ».

Nouveau paragraphe à ajouter à la suite du paragraphe 51e

« (51f) Lorsque le travail implique une exposition aux rayons β de $E_{\max} > 2,5$ MeV, il peut être nécessaire d'utiliser des lunettes spéciales ou une autre protection adéquate pour maintenir la dose au cristallin en-deçà des limites admissibles. Dans le cas d'une exposition à des rayons β d'énergie plus faible, s'il est impossible de mettre en œuvre une telle protection, la faible dose de rayonnement β au cristallin qui s'ajoute à la dose déjà admise pour des rayonnements plus pénétrants, tels que les rayons γ ou les neutrons, est admissible à condition que la dose à la peau soit limitée au niveau recommandé au paragraphe 52a ».

Paragraphes supplémentaires concernant l'application des paragraphes 49, 51d et 51e à des cas d'irradiation interne

En ce qui concerne le paragraphe 49 :

« (52e) Une ou plusieurs expositions de courte durée à des substances radioactives (simultanément avec une irradiation externe quelconque) dans une période de 13 semaines consécutives, sont considérées comme acceptables si la quantité totale de substances radioactives absorbée au cours de cette période ne dépasse pas celle qui résulterait de l'absorption, pendant 13 semaines, aux niveaux maximaux définis dans le rapport de 1959 du Comité II pour l'exposition professionnelle à ces substances radioactives. La dose délivrée à l'organe critique, par suite de cette absorption, dans les 50 années qui suivront ne dépassera pas la limite trimestrielle fixée pour la dose dans les recommandations de 1958 de la CIPR. Ces limites sont :

- (1) pour l'organisme entier et les gonades : 3 rems
- (2) pour la peau, la thyroïde et l'os* : 8 rems
- (3) pour les autres organes : 4 rems ».

En ce qui concerne le paragraphe 51d :

« (52f) Dans le cas d'une exposition accidentelle importante à des substances radioactives, lorsque la quantité totale de substances radioactives absorbée dépasse celle qui résulterait de l'absorption pendant une année aux niveaux maximaux définis dans le rapport de 1959 du Comité II pour l'exposition professionnelle à ces substances radioactives, l'absorption résultant de cette exposition devra être évaluée et consignée dans le dossier de l'individu intéressé. Les autorités médicales devront être saisies de son cas et prendre les mesures qui s'imposent ».

En ce qui concerne le paragraphe 51e :

« (52g) Tout travail d'urgence impliquant une exposition à des concentrations de substances radioactives supérieures aux limites admissibles, doit être conçu de telle sorte que la quantité totale de substances radioactives, absorbée au cours de l'intervention, ne dépasse pas celle qui résulterait de l'absorption pendant une année aux niveaux maximaux définis dans le rapport de 1959 du Comité II pour l'exposition professionnelle à ces substances radioactives. La dose délivrée de ce fait aux organes critiques dans les 50 années qui suivront ne dépassera pas la limite maximale fixée pour la dose annuelle dans les recommandations de 1958 de la CIPR. Ces limites sont :

- (1) pour l'ensemble de l'organisme et les gonades : 12 rems
- (2) pour la peau, la thyroïde et l'os* : 30 rems
- (3) pour les autres organes : 15 rems

Lorsqu'une telle exposition a eu lieu, les quantités absorbées doivent être évaluées et consignées dans le dossier de l'individu intéressé et des mesures doivent être prises pour prévenir toute exposition ultérieure pendant un temps égal à celui qui aurait été nécessaire pour accumuler cette même quantité par absorption aux niveaux constants définis dans le rapport de 1959 du Comité II pour l'exposition professionnelle à ces substances ».

* fondé sur la présence dans l'organisme de $0,1 \mu\text{Ci}$ de ^{226}Ra (voir rapport du Comité II).

Note explicative concernant les paragraphes 53 à 57 (voir également paragraphes 15, 16, 38 et 39)

La grandeur d'un « groupe » ou d'une « population » est un concept relatif et il est souvent difficile de décider si un groupe doit être considéré comme « grand » et si des populations nationales relativement petites doivent être appelées population « tout entière », lorsqu'il s'agit d'expositions dont l'importance dépend de la grandeur du groupe exposé. La grandeur du groupe n'intervient pas dans le cas d'exposition individuelle ; les groupes ne sont alors définis que pour permettre la distinction entre individus pour lesquels, pour diverses raisons, les doses maximales admissibles recommandées sont différentes ou pour lesquels l'appartenance à un certain groupe donne lieu à des recommandations plus particulières en ce qui concerne la surveillance individuelle, les examens médicaux et le contrôle des mesures de protection. Cependant, lorsqu'on évalue, par exemple, l'exposition moyenne, c'est la population « tout entière » qui intervient et la responsabilité de l'interprétation de ce concept appartiendra aux autorités administratives nationales et internationales responsables de l'application légale des mesures de protection.

Nouvelle section concernant l'exposition de membres individuels du public (à introduire à la suite du paragraphe 57).

Une nouvelle section, intitulée « EXPOSITION DU PUBLIC » doit être introduite à la suite de celle intitulée « EXPOSITION DE GROUPES SPÉCIAUX » (paragraphes 53-57). Le texte à ajouter, relatif à la fois à l'irradiation externe et à l'irradiation interne, est le suivant : « La limite maximale de la dose totale pour des individus appartenant au public (à l'exclusion des individus professionnellement exposés et des groupes spéciaux B(a) et B(b)) doit être celle recommandée pour les membres du groupe spécial B(c) (cf. paragraphe 55) ».

Correction à apporter au paragraphe 65

Le chiffre « 1,7 » au paragraphe 65, addendum c, est une erreur d'impression et doit être remplacé par « 0,7 ».

Interprétation du paragraphe 68

En ce qui concerne l'exposition admissible des populations à des sources artificielles de

rayonnements ionisants, les limites fixées sont fondées sur la dose reçue par les différents organes du corps humain et non sur les concentrations maximales admissibles ou autres critères qui déterminent la dose. Néanmoins, pour pouvoir faire des prévisions, il est nécessaire de disposer de quelques directives telles que celles données au paragraphe 68. Le terme « moyenne » au paragraphe 68 se rapporte à la concentration en nuclides radioactifs dans l'ensemble de ce qui est absorbé par une personne moyenne de la population, concentration dont la moyenne a été établie sur une année.

NOTES SE RAPPORTANT A DES SUJETS NON INCLUS DANS LES RECOMMANDATIONS DE 1958

Exposition professionnelle des femmes enceintes

En ce qui concerne l'exposition professionnelle des femmes enceintes, la Commission indique que :

- (1) C'est essentiellement en raison des dommages somatiques qui pourraient être provoqués dans les tissus foetaux que les femmes enceintes posent un « problème de risque particulier » dans le cas d'exposition professionnelle.
- (2) Toute recommandation spéciale pour les femmes enceintes doit, dans la pratique, s'appliquer à toutes les femmes en âge de procréer.

Horaires de travail et durée des congés

La Commission estime qu'avec les niveaux actuels des expositions maximales admissibles, aucun régime particulier concernant les heures de travail et la durée des congés pour les travailleurs sous rayonnements, ne s'impose.

Exposition en cas d'urgence des populations avoisinantes.

Ce sujet a été discuté en détail au cours des réunions de Munich et la Commission pense que le rapport anglais [7] recommandant des critères pour les niveaux acceptables, dans des conditions d'urgence, pour ^{131}I , ^{90}Sr , ^{90}Y et ^{137}Cs ingérés dans les aliments ou le lait, constitue une façon sûre et utile d'aborder ce sujet.

BIBLIOGRAPHIE

1. Recommandations de la Commission Internationale de Protection Radiologique (révisées le 1^{er} décembre 1954), *Brit. J. Radiol.*, 1955, suppl. 6 et *J. Radiol. Electrol.*, octobre 1955, 36, n° 10bis.
2. Rapport sur les amendements apportés en 1956 aux recommandations de la Commission Internationale de Protection Radiologique, *Acta radiol.*, Stockh., 1957, 48, 493-495; *Radiology*, 1958, 70, 261-262; *Fortschr. Röntgenstr. Nuklearmed.*, 1958, 88, 500-502.
3. *Recommandations de la Commission Internationale de Protection Radiologique (Adoptées le 9 Septembre 1958)*. Pergamon Press, Londres, 1959 (ICRP Publication 1). Figurent dans le présent volume.
4. *Rapport du Comité II sur la dose admissible en cas d'irradiation interne* (1959). Pergamon Press, Londres, (ICRP Publication 2) ; Paris, (Publication CIPR 2).
5. *Rapport du Comité III sur la protection contre les rayons X jusqu'à des énergies de 3 MeV et contre les rayonnements β et γ provenant de sources scellées* (1959). Pergamon Press, Londres, (ICRP Publication 3). Édition française, sous presse.
6. Exposure of man to ionizing radiation arising from medical procedures. Rapport de la Commission Internationale de Protection Radiologique et de la Commission Internationale des Unités et Mesures Radiologiques. *Phys. in Med. Biol.*, 1957, 2, 107-151.
7. Rapport du Comité de protection contre les rayonnements ionisants (Président : E. E. POCHIN) au Medical Research Council : Maximum permissible dietary contamination after the accidental release of radioactive material from a nuclear reactor. *Brit. Med.J.*, 1959, 1, 967-969.

RAPPORT DU COMITÉ II SUR LA DOSE ADMISSIBLE EN CAS D'IRRADIATION INTERNE (1959)

I. INTRODUCTION

Le Comité II de la Commission Internationale de Protection Radiologique, CIPR, a pour tâche de recommander des valeurs donnant la quantité maximale admissible, q , de radionuclides dans l'organisme et la concentration maximale admissible, CMA, de ces nuclides dans l'air et dans l'eau (ou dans les aliments). Ces valeurs n'existent que pour les radionuclides les plus importants et sont applicables essentiellement à l'exposition professionnelle. Le Comité a reconnu que de telles compilations sont d'une utilité restreinte, à moins d'être périodiquement révisées pour tenir compte des meilleurs renseignements disponibles et élargies pour inclure les valeurs rendues nécessaires par les nouveaux développements et les nouvelles applications. Le Comité a travaillé en collaboration étroite avec plusieurs comités nationaux et en particulier avec le Comité de la dose interne du Comité National de Protection contre les Rayonnements des États-Unis, CNPR, pour rassembler ces données et pour mettre à jour les publications antérieures sur la dose d'irradiation interne, publiées par le CNPR (1953) ⁽¹⁾ et par la CIPR (1955) ⁽²⁾. Les membres des deux Comités espèrent que ce rapport qui est une révision et une extension des publications antérieures, constituera de plus un moyen pour harmoniser et unifier les objectifs et les principes utilisés par le comité international et par les divers comités nationaux pour arriver à leurs décisions. Il faut espérer que les comités nationaux sur la dose d'irradiation interne appliqueront les mêmes principes fondamentaux de protection radiologique et adopteront les valeurs d'exposition admissible recommandées par la CIPR ou indiqueront les conditions et considérations qui entraînent leur modification.

Les recommandations fondamentales concernant l'exposition aux rayonnements ont été révisées par la CIPR ⁽³⁾ au cours des dernières années et sont réimprimées dans le présent volume. Des révisions semblables ont été faites par le CNPR ⁽⁴⁾. Une étude du rapport fait en 1958 par la CIPR montre que les principaux changements intéressant le Comité II sont les suivants :

- (1) Au lieu d'une limite hebdomadaire, on recommande une limite trimestrielle, ce qui donne une plus grande souplesse pour l'exécution d'un grand nombre d'opérations.
- (2) Alors que ces doses trimestrielles admissibles sont tout à fait comparables aux précédentes doses admissibles, on a fixé une limite pour la dose intégrée dans le cas d'exposition des organes sanguiformateurs et des gonades. Les recommandations de la CIPR ⁽³⁾ appliquent également la limitation de la dose intégrée au cas d'exposition des cristallins des yeux, mais les données à ce sujet sont si insuffisantes que, dans le présent rapport, les yeux n'ont pas été pris comme organe de référence.

(3) Des recommandations explicites sont données pour quelques groupes non professionnels et des limites sont suggérées pour la population tout entière.

En comparant la publication ci-dessous aux rapports antérieurs, on remarquera les modifications très importantes exigées par de nouvelles données et de nouvelles méthodes d'estimation de la dose d'irradiation interne et on constatera que le nombre de radionuclides figurant dans les publications antérieures a été environ multiplié par trois. Toutes les données biologiques et physiques utilisées dans les rapports antérieurs ont été revues et les valeurs d'exposition admissible révisées en conséquence. Des calculs plus précis pour l'exposition du tractus gastro-intestinal et pour des chaînes de radionuclides dans l'organisme ont abouti à de nouvelles valeurs pour un grand nombre de limites admissibles. Le modèle de fonction puissance est discuté, en annexe, comme une autre méthode pour évaluer la quantité présente dans l'organisme de certains radionuclides de période longue. Les données des tableaux sont établies conformément au modèle exponentiel ou à compartiments qui rend compte de la rétention et de l'élimination, mais les concentrations maximales admissibles (CMA) et les quantités admissibles dans l'organisme, données dans les tableaux, ont été choisies après que le Comité ait examiné attentivement les valeurs obtenues à partir des deux modèles. Bien qu'il soit évidemment impossible d'être tout à fait à jour en ce qui concerne la littérature dans un domaine à évolution aussi rapide, ce rapport révisé contient probablement les observations les plus importantes faites jusqu'à la fin de 1957, ainsi que celles rencontrées dans quelques publications parues au début de 1958.

Toutes les valeurs indiquées pour les CMA sont données, d'une part pour une semaine de travail de quarante heures, d'autre part pour une exposition continue, c'est-à-dire pour une semaine de 168 heures. Dans les publications parues antérieurement sur la dose d'irradiation interne, on donnait des valeurs fondées sur une exposition continue, d'une part parce que ces mêmes valeurs étaient parfois utilisées, avec un facteur approprié, pour des cas d'exposition continue non professionnelle, d'autre part parce que la durée réelle de la semaine de travail était variable. On a ajouté ici les valeurs établies pour une semaine de travail de 40 heures, car elles s'appliquent directement aux conditions normales de travail rencontrées dans de nombreux pays.

Les valeurs données pour l'exposition professionnelle continue peuvent être utilisées pour établir les niveaux admissibles pour des groupes spéciaux et pour le public, conformément au rapport de la CIPR ⁽³⁾. Les facteurs qu'il convient d'appliquer pour obtenir les niveaux admissibles dans le cas de ces groupes sont discutés aux paragraphes II.3 et II.4. Comme les valeurs indiquées pour l'exposition continue font abstraction de quelques considérations importantes, en particulier des différences entre enfants et adultes, il faut souligner que, même corrigées par l'application des facteurs mentionnés ci-dessus, ces valeurs ne peuvent être considérées que comme des valeurs provisoires pour l'exposition non professionnelle. On espère que le terme de « valeurs pour l'exposition professionnelle continue » soulignera la nature provisoire de leur application à d'autres cas.

Bien que les données sur lesquelles sont fondées les valeurs des CMA soient très incomplètes et parfois incertaines, elles tiennent compte des meilleures et plus récentes recherches de centaines de savants et on pense que ces valeurs sont les

meilleures que l'on puisse avoir à l'heure actuelle. Elles devraient être utilisées comme valeurs de référence permettant d'apprécier si les techniques utilisées dans la pratique sont telles qu'elles garantissent que la dose délivrée par les substances radioactives fixées dans l'organisme ne dépasse pas la limite admissible correspondante fixée par la CIPR.

Dans le cas de nombreux radionuclides, la période d'irradiation peut s'étendre sur un grand nombre de mois ou même sur toute la vie d'un individu, même si l'absorption s'est produite en un temps relativement court. Lorsque des contaminants radioactifs sont introduits dans l'organisme, il est souvent difficile de faire une évaluation précise de la quantité totale présente dans l'organisme ou de sa répartition topographique. Dans la plupart des cas, même lorsqu'il est établi qu'une personne présente une contamination interne importante par un nuclide radioactif, peu de moyens permettent d'en activer l'élimination. Il existe une théorie suivant laquelle toute dose de rayonnement ionisant, aussi faible soit-elle, peut entraîner un dommage génétique ou somatique et, c'est pourquoi, on pense qu'il est prudent d'éviter toute exposition inutile aux nuclides radioactifs. Plusieurs organismes nationaux ⁽⁵⁾ et internationaux ⁽⁶⁾ ont souligné ce point. Cependant, en l'état actuel de nos connaissances, l'exposition professionnelle d'un individu, au cours de toute sa carrière, aux valeurs maximales admissibles recommandées dans le présent rapport, ne devrait pas entraîner de risque appréciable de dommage pour cet individu, ni faire courir un risque plus grand que ceux communément acceptés dans d'autres industries modernes. Les valeurs données dans ce rapport correspondent à l'exposition professionnelle et elles doivent être corrigées pour d'autres usages par l'application de facteurs appropriés ; dans tous les cas, les doses tissulaires qui en résultent sont considérées comme venant s'ajouter à celles reçues du fait de la radioactivité naturelle et de l'exposition à des fins médicales.

II. NORMES FONDAMENTALES D'IRRADIATION INTERNE MAXIMALE ADMISSIBLE

1. *Catégories d'exposition.* La CIPR ⁽³⁾ a fait des recommandations fondamentales ou des propositions concernant l'exposition aux rayonnements ionisants pour les catégories d'exposition suivantes :

A. *Exposition professionnelle.*

B. *Exposition de groupes spéciaux.*

(a) Adultes travaillant au voisinage de zones contrôlées (voir paragraphes 71 et 72 du rapport de la CIPR ⁽³⁾), mais qui ne sont pas employés personnellement à un travail impliquant un risque d'exposition aux rayonnements.

(b) Adultes pénétrant occasionnellement dans les zones contrôlées en raison de leur activité professionnelle, mais qui ne sont pas considérés comme travailleurs professionnellement exposés.

(c) Individus du public habitant au voisinage de zones contrôlées.

C. *Exposition du public.*

En principe, il faut considérer à la fois l'exposition des individus et les moyennes établies sur l'ensemble de la population, mais on n'a fait des recommandations

concernant l'exposition individuelle que pour les groupes (A) et (B). De plus, la CIPR considère que les doses reçues du fait de la radioactivité naturelle ou les doses individuelles résultant d'une irradiation pratiquée à des fins médicales et pour des examens dentaires, doivent s'ajouter aux doses maximales admissibles recommandées dans le rapport.

2. *Exposition professionnelle (catégorie A). Voir paragraphes 46-52, rapport CIPR (3).* Les règles fondamentales qui s'appliquent à l'exposition professionnelle due à des radionuclides introduits dans l'organisme sont les suivantes :

(a) La dose délivrée aux gonades ou à l'organisme entier en toute période de 13 semaines consécutives ne doit pas dépasser 3 rems. La dose délivrée aux gonades ou à l'organisme entier, à un âge de N ans, ne doit pas dépasser 5 ($N - 18$) rems dans le cas où l'exposition professionnelle commence au-delà de l'âge de 18 ans. Si l'exposition professionnelle commence avant l'âge de 18 ans, la dose annuelle avant 18 ans ne doit pas dépasser 5 rems et la dose à l'âge de 30 ans ne doit pas dépasser 60 rems.

(b) La dose EBR effective délivrée à l'os par irradiation interne ou externe en toute période de 13 semaines ne doit pas dépasser, en moyenne sur l'ensemble du squelette, la dose EBR moyenne délivrée au squelette par suite de la présence dans l'organisme de $0,1 \mu\text{Ci}$ de ^{226}Ra . On admet que cela correspond à un débit de dose de $0,56 \text{ rem/semaine}$ dans le cas de ^{226}Ra (calculé à partir d'un débit de dose de $0,06 \text{ rad/semaine}$, une EBR de 10 et $n = 1$). Lorsqu'on calcule la dose EBR effective délivrée au squelette, toute énergie absorbée doit être pondérée par un facteur de dommage relatif, n . Le facteur de dommage relatif, n , est pris égal à 1 pour toute énergie absorbée provenant d'une irradiation externe et pour tous les émetteurs internes lorsque l'élément introduit dans l'organisme est un isotope du radium. Si l'isotope introduit dans l'organisme n'est pas un isotope du radium, le facteur de dommage relatif, n , est pris égal à 1 pour toute énergie absorbée provenant d'un rayonnement X ou γ , et égal à 5 pour toutes les autres composantes de l'énergie, qu'elles proviennent de l'élément parent ou de ses produits de filiation engendrés dans l'organisme. L'énergie effective est indiquée dans le tableau 5 comme $\Sigma EF(\text{EBR})n$. Pour une discussion plus détaillée et des exemples, voir paragraphes IV.2 et V.1.

(c) La dose délivrée à tout organe du corps pris isolément, à l'exception des gonades, de l'os, de la peau et de la thyroïde, ne doit pas dépasser 4 rems en une période quelconque de 13 semaines, ou 15 rems en un an. La dose délivrée à la peau et à la thyroïde ne doit pas dépasser 8 rems en une période quelconque de 13 semaines, ou 30 rems en un an.

La décision prise par la CIPR (7) (1956) de fixer l'exposition externe professionnelle moyenne à 5 rems/an (ce qui correspond à $0,1 \text{ rem/semaine}$) n'est pas appliquée dans les calculs de dose interne, excepté dans les cas où les radionuclides sont distribués assez uniformément à travers l'organisme ou lorsqu'ils sont concentrés dans les gonades. La limitation de la dose hebdomadaire moyenne délivrée à l'organisme entier ($0,1 \text{ rem}$) à un tiers de la dose hebdomadaire maximale admise auparavant ($0,3 \text{ rem}$) avait pour but de réduire l'incidence possible de certains types de dommage somatique, par exemple la leucémie radioinduite et le raccourcissement de la durée de vie qui sont considérés comme résultant essen-

tiellement d'une irradiation totale de l'organisme. Naturellement, la réduction de la dose délivrée aux gonades avait pour but de réduire l'incidence de mutations génétiques délétères dont les effets apparaîtraient dans les générations futures.

Comme la réduction de la dose accumulée s'applique principalement à la dose reçue par l'organisme entier et à la dose reçue par les gonades, il n'y a pas de modification fondamentale du débit de dose EBR admissible, dans le cas où ce sont des organes pris isolément ⁽⁸⁾ tels que le foie, la rate, l'os, le tractus gastro-intestinal (TGI) et les reins qui constituent les organes critiques, pour les raisons données au paragraphe 14 du rapport de la CIPR ⁽⁸⁾. Il faut noter que les limites recommandées ici constituent des maximums. Dans la pratique, l'individu professionnellement exposé moyen recevrait une dose bien plus faible.

Il est, en général, difficile d'estimer directement la quantité de radioélément dans l'organisme ou la dose délivrée à un organe particulier ou à l'ensemble de l'organisme et, dans la plupart des cas, les mesures que l'on peut prendre pour réduire la quantité de radioélément dans l'organisme sont assez inefficaces et difficiles à mettre en œuvre. Par suite, le seul moyen pratique pour la protection collective des travailleurs professionnellement exposés est de limiter la concentration des divers radionuclides dans l'eau, les aliments ou l'air susceptibles d'être absorbés. C'est pourquoi il est recommandé que :

(1) en l'absence de toute exposition externe professionnelle, la concentration d'un radionuclide ou d'un mélange de radionuclides dans l'air et dans l'eau qui pourraient être absorbés par le personnel de l'usine en une semaine de travail de 40 heures, soit maintenue à des niveaux qui ne dépassent pas les valeurs correspondantes des CMA, données dans ce rapport. Lorsqu'il y a un risque d'exposition externe professionnelle, les valeurs des CMA doivent être abaissées de manière à ramener les doses EBR totales dans les limites prescrites par les normes fondamentales. Par exemple, si la dose trimestrielle admise pour un organe dans les normes fondamentales est de D rems et si l'irradiation externe délivre une dose de E rems par trimestre, les CMA calculées pour cet organe doivent être réduites d'un facteur $(D-E)/D$. Les calculs donnant un niveau acceptable dans le cas d'un mélange de radionuclides sont discutés au paragraphe IV.8.

(2) d'autre part, on peut tolérer qu'au cours d'une période de 13 semaines, les concentrations des divers radionuclides présents dans l'air ou dans l'eau varient, à condition que la quantité totale absorbée en une période quelconque de 13 semaines ne dépasse pas celle qui serait absorbée par suite de l'exposition aux niveaux constants mentionnés dans l'alinéa (1) ci-dessus. Il faut remarquer que, tout en étant en accord avec les recommandations fondamentales, cette méthode est d'utilisation peu commode, coûteuse et en général difficile parce qu'elle exige un contrôle précis et continu des lieux de travail et la tenue d'archives détaillées d'irradiation pour chaque individu. Aussi, son utilisation est-elle justifiée seulement dans des cas exceptionnels.

Le procédé le plus sûr et le plus simple à utiliser pour rester dans les limites fondamentales (a), (b) et (c) du paragraphe II.2, consiste à maintenir le niveau de contamination de l'air, de l'eau ou des aliments absorbés dans la zone contrôlée par le personnel d'une usine, à un niveau égal ou inférieur à celui correspondant aux valeurs des CMA. Ces valeurs sont données pour les durées d'exposition de

40 heures par semaine et de 168 heures par semaine. Si une personne est affectée à un travail tel qu'elle passe seulement 8 heures par semaine dans la zone d'exposition, les valeurs des CMA que l'on peut appliquer sont égales à cinq fois celles indiquées dans le tableau 1 pour une semaine de 40 heures. Cependant, il faut alors établir avec beaucoup de soin que cette personne n'est effectivement soumise à aucun risque d'exposition pendant le reste de sa semaine de travail. Si elle passe 48 heures chaque semaine dans la zone d'exposition, les valeurs des CMA que l'on peut appliquer sont égales aux 5/6 de celles données dans le tableau 1 pour une semaine de travail de 40 heures. De même, lorsqu'on applique ces valeurs aux aliments, elles exigent en général des modifications pour tenir compte de la quantité ingérée. Ce sujet est discuté plus en détail au paragraphe IV.9.

Bien que la formule $5(N - 18)$ admette seulement une dose annuelle moyenne de 5 rems pour l'organisme entier et pour les gonades, les recommandations de la CIPR admettent jusqu'à 3 rems en un laps de temps quelconque (par exemple une minute, un jour, une semaine, etc...), à condition que la dose reçue au cours de toute période de 13 semaines consécutives ne soit jamais supérieure à 3 rems. Ainsi, une personne plus âgée peut recevoir jusqu'à 12 rems en une seule année, à condition que sa dose cumulée ne dépasse pas les limites prescrites par la formule $5(N - 18)$. Bien qu'une certaine souplesse soit également admise en principe pour les irradiations internes, dans la pratique il est risqué et habituellement peu commode d'augmenter les valeurs des CMA au-delà de celles calculées pour un travail de longue durée. Cependant, les niveaux admissibles tiennent compte de la durée d'exposition (par exemple : si les expositions professionnelles ne durent qu'une heure par semaine, les CMA données pour une semaine de 40 heures peuvent être multipliées par un facteur 40), mais s'il y a des irradiations externes simultanées, les CMA doivent être réduites de manière telle que la dose totale délivrée à n'importe quel organe ne dépasse pas les limites maximales admissibles. Dans des cas individuels particuliers, lorsqu'il est possible d'exercer une surveillance suffisante (appareils de contrôle de l'irradiation externe, analyses des liquides biologiques, contrôles de l'air, etc.), lorsqu'aucune exposition n'a été reçue pendant la période de 13 semaines qui précède et que la limite fixée par la formule $5(N - 18)$ n'est pas dépassée, une personne peut travailler pendant une heure dans un lieu où la concentration dans l'air d'un isotope est de $40 \times 13 \times 12/5 = 1200 \times (CMA)_a$ pour la semaine de 40 heures, l'organisme entier étant pris comme organe critique ; mais, dans ce cas, aucune exposition ultérieure ne devra être tolérée pendant 13 semaines. Cette pratique doit être déconseillée à cause de la lenteur et de l'imprécision des méthodes qui permettent d'estimer la quantité de radioélément présente dans l'organisme et la dose délivrée à un organe par des substances radioactives ainsi déposées à l'intérieur du corps. Cependant, si de telles expositions à l'air contaminé sont inévitables, la dose peut souvent être réduite efficacement par le port de masques appropriés et soigneusement ajustés.

3. *Exposition de groupes spéciaux (catégorie (B)). Voir paragraphes 53-57, rapport CIPR (3).* Pour un individu appartenant à l'un ou à l'autre des groupes B(a) ou B(b), la dose aux gonades ou aux organes sanguiformateurs ne doit pas dépasser 1,5 rem/an ; pour un individu de la catégorie B(c), la limite correspondante est

fixée à 0,5 rem/an. En l'absence de toute irradiation externe due à des opérations effectuées dans la zone contrôlée, les valeurs correspondantes des CMA pour les groupes B(a) et B(b) sont égales à 3/10 des valeurs professionnelles pour la semaine de 40 heures et, pour le groupe B(c), elles correspondent à 1/10 des valeurs professionnelles pour l'exposition continue, c'est-à-dire pour la semaine de 168 heures. Lorsque les opérations effectuées à l'intérieur de la zone contrôlée entraînent une irradiation externe et que la dose due à cette irradiation est de E rems/an, ces valeurs doivent être réduites d'un facteur $(D - E) / D$ où $D = 1,5$ pour les groupes B(a) et B(b) et $D = 0,5$ pour le groupe B(c). Le calcul de la CMA pour un mélange est discuté au paragraphe IV.8.

Si l'irradiation (externe et interne) n'atteint pas de façon importante les gonades ou les organes sanguiformateurs, la CMA pour un individu appartenant au groupe B(c) sera égale à 1/10 de la CMA donnée pour l'exposition professionnelle continue. L'exposition d'un individu appartenant au groupe B(a) ou au groupe B(b) étant directement liée à son travail à l'intérieur ou à proximité de la zone contrôlée, la CMA pour cet individu sera égale à 1/10 de la CMA donnée pour l'exposition professionnelle d'un individu effectuant un travail hebdomadaire de même durée. Par exemple, si le temps de travail est de 40 heures par semaine, la CMA pour des individus appartenant aux groupes B(a) et B(b) sera égale à 1/10 de la CMA fixée pour une semaine de 40 heures.

4. Exposition des populations (catégorie (C)). Voir paragraphes 58-68, rapport CIPR (3).

(a) Dose génétique et dose délivrée à l'organisme entier. Dans un rapport publié récemment (3), la CIPR a proposé des limites pour la dose génétique *moyenne* d'une population. Les limites proposées ne sont pas considérées comme définitives, mais sont données comme indication pour l'élaboration des programmes d'énergie nucléaire. A titre d'essai, en tolérant 2 rems à l'âge de 30 ans, comme dose génétique moyenne pour l'irradiation à partir des sources artificielles (à l'exclusion de l'irradiation à des fins médicales), on a proposé de limiter la dose reçue par les gonades à partir de ces sources à 1,5 rem pour l'irradiation interne et à 0,5 rem pour l'irradiation externe. Comme les normes professionnelles d'exposition continue (168 heures par semaine) admettent une dose de 5 rems/an $\times$ 30 ans = 150 rems en 30 ans aux gonades, la concentration maximale admissible donnée pour l'exposition professionnelle continue doit être multipliée par un facteur égal à 0,01 pour arriver à un niveau constant équivalent d'exposition. La CIPR a proposé d'appliquer la même limite à la dose (1,5 rem/30 ans) et le même facteur de réduction (0,01) lorsque l'organisme entier constitue l'organe critique. Excepté dans un petit nombre de cas, on manque de données suffisantes pour estimer la dose-gonades. En l'absence d'une CMA fondée sur la dose-gonades, on recommande d'utiliser le centième de la CMA donnée pour l'organisme entier. Le Comité étudie actuellement l'importance de la contribution d'un grand nombre de ces nucléides à la dose-gonades.

(b) Dose somatique. Dans le cas d'un radionucléide ou d'un mélange de radionucléides qui n'a pour organe critique ni l'organisme entier ni les gonades, on propose que le niveau moyen admissible pour de grandes populations soit égal au trentième de la valeur admise pour l'exposition professionnelle continue (168 heures par semaine) calculée conformément aux règles fondamentales (b) et (c)

données au paragraphe II.2 ci-dessus. Le Comité de la dose d'irradiation interne de la CIPR et ceux de plusieurs organismes nationaux étudient actuellement le problème des effets à long terme d'une exposition à faible dose pour le public, notamment en ce qui concerne le dommage somatique que pourrait subir l'individu exposé, le dommage génétique qui pourrait en résulter pour ses enfants, le dommage écologique, etc...

III. VALEURS MAXIMALES ADMISSIBLES POUR L'EXPOSITION PROFESSIONNELLE

1. *Hypothèses fondamentales et restrictions s'appliquant aux valeurs maximales admissibles d'exposition indiquées dans le tableau 1.* Les valeurs de q et des CMA pour un individu dépendront d'un grand nombre de facteurs tels que son âge, sa condition physique, ses habitudes alimentaires, son niveau d'hygiène. Elle dépendront également des propriétés physiques et chimiques de la substance radioactive, ainsi que du mode d'absorption — par ingestion, par inhalation, à travers une blessure ou par absorption à travers la peau. Le manque de données concernant l'influence de la plupart de ces facteurs ne permet pas d'en faire une étude détaillée. Pour maintenir le travail requis et l'ampleur de ce rapport dans des limites raisonnables et pour satisfaire cependant aux besoins essentiels des utilisateurs scientifiques et industriels de radioisotopes, il a été nécessaire de limiter rigoureusement le nombre de facteurs pris en considération. C'est pourquoi, les valeurs des CMA n'ont été indiquées que pour des composés relativement insolubles et pour les composés solubles les plus courants, et ces composés sont caractérisés seulement par leur degré de solubilité et non par une structure chimique déterminée. Les seuls modes d'absorption considérés sont l'ingestion et l'inhalation, sauf dans un petit nombre de cas — où l'immersion constitue le critère de risque le plus grand. Tous les calculs ont été établis pour un « homme standard » et ne rendent pas compte, de ce fait, des variations individuelles. L'homme standard est défini dans les tableaux 6 à 11 ; il représente une version quelque peu modifiée de l'homme standard défini à la conférence de Chalk River ⁽⁹⁾ (septembre 1949). Cet homme standard est conçu pour représenter un adulte moyen ou caractéristique qui serait exposé professionnellement.

D'une manière idéale, la quantité maximale admissible de radioélément dans l'organisme, q , et la concentration maximale admissible, CMA, devraient être établies à partir d'études faites sur des êtres humains qui ont été exposés à un radionuclide particulier et l'ont absorbé dans des conditions de travail et pendant un temps assez long, c'est-à-dire dans des circonstances semblables à celles qui caractérisent l'exposition professionnelle moyenne. Cependant, les données concernant l'homme sont extrêmement rares et c'est seulement dans le cas du radium que l'on dispose de telles données sur une période de 50 ans, temps minimal nécessaire pour extraire des valeurs concernant l'exposition chronique de l'homme. Des études ont été faites, récemment, à l'aide de compteurs permettant la mesure de la radioactivité sur tout ou partie de l'organisme, pour déterminer l'absorption, la répartition et l'élimination de quelques radionuclides à l'état de traces dans l'organisme humain. Dans quelques cas, certains radionuclides ont été administrés

à des personnes en thérapeutique, dans d'autres cas, des accidents ont entraîné l'absorption de radionuclides dans l'organisme. Les données recueillies dans ces cas d'exposition de l'homme ont été attentivement étudiées et, chaque fois que cela était possible, elles ont été substituées dans le présent rapport aux données antérieures obtenues par expérimentation sur l'animal. Pour la plupart des radionuclides, on manque de données humaines et, dans ce cas, les données recueillies par expérimentation sur l'animal doivent être extrapolées à l'homme. Parfois, on ne dispose même pas de données sur l'animal et des estimations sont faites par comparaison avec des éléments ayant un comportement chimique similaire. Des études récentes sur la répartition, dans l'organisme humain, d'éléments stables à l'état de traces et d'oligoéléments⁽¹⁰⁾ ont été particulièrement utiles pour ces révisions. On suppose que la répartition normale des éléments stables dans les différents organes du corps est représentative de la répartition qui résulterait de l'exposition chronique de l'homme aux radionuclides de ces mêmes éléments et que leur forme chimique est similaire. De même, une étude du bilan métabolique entre les éléments à l'état de traces et les oligoéléments dans les aliments et l'eau, l'urine et les fèces de l'homme a fourni une indication directe pour les CMA des radionuclides de ces éléments. En raison des nombreuses hypothèses et approximations faites lors de l'exploitation d'un grand nombre de ces données dans la présente publication, des recherches trop poussées dans les calculs ne sont en général pas justifiées.

Le tableau 1 donne les valeurs recommandées pour la quantité maximale admissible dans l'organisme entier, q , et la concentration maximale admissible dans l'air, $(CMA)_{air}$, et dans l'eau $(CMA)_{eau}$, de 240 radionuclides environ. L'ingestion quotidienne d'eau utilisée pour le calcul de la $(CMA)_{eau}$ comprend la teneur en eau des aliments ; aussi, n'est-il nécessaire de considérer l'ingestion d'un radionuclide dans les aliments que lorsqu'il se concentre dans cet aliment au cours de la préparation ou qu'il y pénètre à partir d'autres sources. Dans de tels cas, on peut utiliser les valeurs $(CMA)_{eau}$ du tableau 1, converties en microcuries par gramme, après introduction d'une correction pour l'ingestion quotidienne, c'est-à-dire pour tenir compte de l'ingestion totale de radionuclides dans le régime alimentaire complet. Ce rapport contient des valeurs concernant tous les radionuclides énumérés dans les publications antérieures du CNPR⁽¹⁾ (1953) et de la CIPR⁽²⁾ (1955), ainsi que d'autres valeurs devenues nécessaires et pour lesquelles on disposait des données biologiques indispensables. A de rares exceptions près (par exemple certains produits de filiation et états isomères), les radionuclides dont la période physique est inférieure à 1 heure ne sont pas mentionnés dans le tableau 1. Les principales hypothèses et conditions sur lesquelles reposent les calculs sont les suivantes.

(a) Dans tous les cas, les valeurs sont données à la fois pour les composés solubles et pour les composés insolubles (exception faite du cas de quelques gaz rares pour lesquels les seules valeurs données se réfèrent à l'immersion d'une personne dans le gaz). Les valeurs les plus faibles obtenues pour les $(CMA)_{air}$ et les $(CMA)_{eau}$ sont indiquées en caractères gras aussi bien pour les formes solubles que pour les formes insolubles de l'isotope. Les organes auxquels se rapportent ces valeurs sont appelés organes critiques et imprimés en caractères gras dans le tableau 1.

(b) Dans tous les cas, les valeurs sont calculées, d'une part pour une exposition professionnelle au rythme de 40 heures/semaine, 50 semaines par an, pendant une période de travail continue de 50 ans et, d'autre part, pour une exposition permanente, c'est-à-dire 168 heures/semaine pendant 50 ans.

(c) Dans tous les cas, le débit de dose calculé qui détermine la CMA tient compte des quantités réelles de radionuclide dans l'organisme ou dans l'organe critique, plutôt que d'un état supposé d'équilibre. Les valeurs des CMA établies pour un organe critique sont régies par la condition suivante : le débit de dose (en rems/semaine), après 50 ans d'exposition professionnelle, ne doit pas dépasser les valeurs prévues en (a), (b) et (c) du paragraphe II.2. En une période d'exposition de 50 ans, la plupart des radionuclides atteignent leur équilibre, car leur période effective est courte comparée à une telle durée de travail (autrement dit, le terme $e^{-0,693 t/T}$ dans les équations (7) et (8) est très voisin de zéro pour $t = 50 \times 365$ jours). Les exceptions à cette règle sont indiquées dans le tableau 2. Dans la colonne 5 du tableau 2, on a donné la période effective et, dans la colonne 6, le pourcentage d'équilibre atteint par la quantité de radionuclide présente dans l'organisme après 50 ans d'exposition professionnelle. La plupart de ces exceptions appartiennent au groupe d'éléments des terres rares du type 5 f, auxquels on attribue une période biologique de 200 ans. Le cas extrême est constitué par dix de ces radionuclides qui, en 50 ans d'exposition professionnelle, atteignent seulement 16 p. 100 de l'équilibre dans l'organisme.

(d) Dans le cas d'un radionuclide qui décroît en engendrant des produits de filiation, on suppose pour le calcul que seul le radionuclide parent pénètre dans l'organisme, mais le débit de dose que l'on évalue comprend toute l'énergie libérée par les produits de filiation formés dans l'organisme. Il existe cependant deux exceptions, ^{220}Rn et ^{222}Rn , pour lesquels on admet qu'ils sont dans un état d'équilibre caractéristique de celui qui s'établit dans l'air ordinaire. Ces cas sont discutés plus loin. Dans tous les autres cas, on suppose que seul l'élément parent pénètre dans l'organisme. Comme les différents produits de filiation ont en général des périodes effectives différentes, le pourcentage d'équilibre atteint n'est en général pas le même pour tous les éléments de la chaîne. De même, l'énergie effective, c'est-à-dire l'énergie pondérée absorbée par désintégration, n'est pas la même pour des éléments différents de la chaîne, si bien que, après une exposition de 50 ans, le débit de dose ne sera en général pas égal au pourcentage, donné dans le tableau 2, du débit de dose qui résulterait de la présence dans l'organisme du radionuclide à l'équilibre. Ainsi, pour les radionuclides dont la décroissance donne naissance à des produits de filiation, ces pourcentages ne donnent qu'une idée approximative du pourcentage du débit de dose à l'équilibre atteint après 50 ans.

(e) Les hypothèses et formules sont présentées en fonction d'un modèle à compartiments, c'est-à-dire qu'à chaque organe on attribue une période biologique et qu'on admet que le radionuclide qui se concentre dans l'organe est éliminé à un taux constant. En général, il s'agit là d'une simplification beaucoup trop poussée, puisque la représentation mathématique de la rétention dans l'organe exige habituellement l'emploi de plusieurs exponentielles, ou même d'une fonction puissance. Malheureusement, les renseignements biologiques dont on dispose ne

donnent généralement pas d'indications détaillées sur la rétention dans les organes, en particulier pour les conditions et les périodes d'exposition qui nous intéressent ici. Dans son choix de valeurs pour les CMA et les quantités admissibles dans l'organisme, le Comité a considéré les deux modèles représentatifs de la rétention, celui à exponentielles multiples et celui à fonction puissance, chaque fois qu'il disposait de ces renseignements et, dans quelques cas, il a été amené à choisir entre les valeurs calculées à l'aide de ces modèles. En raison de la grande part d'incertitude dans beaucoup de ces cas et pour arriver à une présentation plus homogène et plus simple, les données biologiques sont présentées dans les tableaux suivant un modèle à un seul compartiment pour chaque organe considéré, avec la période biologique correspondante. Celle-ci a été choisie de manière à atteindre, en 50 ans d'exposition à niveau constant, la rétention donnée par le modèle plus complexe; elle peut donc ne pas représenter exactement ce qui se passe en cas d'exposition de courte durée. Le modèle à fonction puissance est discuté en annexe où l'on donne également une table des paramètres nécessaires pour son exploitation.

(f) Si l'exposition professionnelle se poursuit au-delà de 50 ans, le débit de dose continuera à croître dans le cas des radionuclides énumérés au tableau 2, car, dans les conditions présumées, ils n'auront pas atteint leur état d'équilibre; cependant, en ce qui concerne les radionuclides non mentionnés au tableau 2, le débit de dose maximal admissible ne sera pas dépassé. Toutefois, comme il est probable que la durée de l'exposition professionnelle n'excèdera pas sensiblement 50 ans et comme la quantité maximale admissible dans l'organisme, q , ne serait atteinte qu'après une exposition professionnelle de 50 ans aux CMA données dans le tableau 1, le débit de dose moyen sur la vie professionnelle de l'individu sera bien inférieur au débit de dose maximal admissible, même pour les isotopes mentionnés au tableau 2. Tout en étant digne d'attention, cette observation ne change rien au fait que les débits de dose en fin de carrière seraient en infraction par rapport aux critères adoptés en (a), (b) et (c) du paragraphe II.2, quoique la dose intégrée soit indubitablement très inférieure à celle admise pour un grand nombre de radionuclides non énumérés au tableau 2. Dans les publications antérieures ⁽¹⁾ ⁽²⁾, les calculs étaient basés sur une exposition de 70 ans. Bien que cette réduction à 50 ans de la durée d'exposition ait eu très peu d'influence sur les valeurs des CMA (soit une augmentation maximale de 27 p. 100 pour les CMA de certains des radionuclides mentionnés au tableau 2), on pense que cette modification devait être faite dans les calculs car, pour la plupart des travailleurs des établissements atomiques, la carrière professionnelle s'étend de l'âge de 18 ans à l'âge de 65 ans ou au-dessous.

(g) Le débit respiratoire moyen est de 10^7 cm³ par journée de 8 heures de travail; cette quantité représente la moitié de l'air respiré en 24 heures.

(h) La consommation moyenne d'eau est de 1100 cm³ par journée de 8 heures de travail; cette quantité représente la moitié de l'eau consommée en 24 heures.

(i) La dose délivrée par des gaz rares émettant un rayonnement d'énergie suffisante pour pénétrer jusqu'à la couche basale de l'épiderme (7 mg/cm²) est due à une irradiation externe par le nuage environnant de gaz radioactif, plutôt qu'à la quantité de gaz présente dans l'organisme.

(j) En général, il n'a pas été tenu compte de la toxicité chimique pour l'estimation de la quantité maximale admissible dans l'organisme ou des CMA. Cependant, dans le cas de l'uranium, la toxicité chimique a été prise en considération et constitue le critère limitatif pour les isotopes de l'uranium de période relativement longue.

2. *Unités de rayonnement ionisant employées dans le tableau 1.* Dans le tableau 1, les unités employées pour les quantités maximales admissibles, q , des divers radionuclides dans l'ensemble de l'organisme et pour les concentrations maximales admissibles, $(CMA)_{\text{air}}$ et $(CMA)_{\text{eau}}$, dans l'air et dans l'eau, sont respectivement le microcurie (μCi) et le microcurie par centimètre cube ($\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$). Un curie représente une quantité de nuclide radioactif dans laquelle le nombre de désintégrations par seconde est égal à $3,700 \times 10^{10}$; le microcurie représente donc le millionième de cette quantité. Toutefois, conformément à un usage longuement établi, on admet que le curie d'uranium naturel correspond à $3,7 \times 10^{10}$ dés./s provenant de ^{238}U , $3,7 \times 10^{10}$ dés./s provenant de ^{234}U et $1,7 \times 10^8$ dés./s provenant de ^{235}U . De même, on admet que le curie de thorium naturel correspond à $3,7 \times 10^{10}$ dés./s provenant de ^{232}Th et $3,7 \times 10^{10}$ dés./s provenant de ^{230}Th . Le rem est l'unité de dose EBR de rayonnement ionisant dans le tissu. Lorsqu'une dose est exprimée en rems, il est superflu de l'appeler dose EBR. C'est pourquoi, dans ce cas, on emploie le terme de « dose » seul sans qualificatif. Le rem correspond à la dose dans le tissu qui provoque un dommage biologique équivalent à celui produit par rad de rayonnement X (d'environ 200 kV) dont le transfert linéaire d'énergie, TLE, dans l'eau est de 3,5 keV/ μ , autrement dit, $\text{rem} = \text{EBR} \times \text{rad}$. Le rad correspond à une absorption d'énergie de 100 ergs/g, libérée par le rayonnement ionisant dans n'importe quel milieu. Dans le cas étudié, l'absorption d'énergie a lieu dans le tissu. Dans cette publication, l'efficacité biologique relative, EBR, est prise égale à un pour les rayonnements β , γ et X et pour les électrons de conversion (pour les émetteurs β de faible énergie, c'est-à-dire $E_m \leq 0,03 \text{ MeV}$, $\text{EBR} = 1,7$), à 10 pour les particules α et à 20 pour les atomes de recul. Pour des renseignements plus détaillés sur les unités, le lecteur est prié de se reporter au manuel de la Commission Internationale des Unités Radiologiques ⁽¹¹⁾.

3. *Organe critique du corps.* Les valeurs q , indiquées dans la colonne 3 du tableau 1 pour la quantité de radioélément dans l'organisme, sont basées sur la quantité de radionuclide qui est fixée dans l'organisme entier et délivre le débit de dose EBR maximal admissible à l'organe indiqué dans la colonne 2. Les valeurs données pour la concentration dans l'eau (colonnes 4 et 6) et dans l'air (colonnes 5 et 7) sont à leur tour fondées sur l'ingestion et l'inhalation par l'homme standard qui, en 50 ans d'exposition professionnelle, entraînent l'accumulation de cette quantité dans l'organisme. Dans la plupart des cas, on obtient des valeurs sensiblement différentes pour la quantité admissible dans l'organisme lorsqu'on considère les effets produits sur des organes différents. On admet que l'organe critique est celui dont l'atteinte par le rayonnement entraîne le dommage le plus grand pour l'organisme. Il est évident qu'un grand nombre de facteurs doivent être pris en considération pour déterminer l'organe dont l'atteinte entraînera le plus grand

préjudice pour l'organisme. Les critères suivants sont d'importance primordiale : (a) l'organe dans lequel la concentration de la substance radioactive est la plus grande ; (b) le rôle essentiel ou indispensable que joue l'organe dans le bon fonctionnement de l'organisme entier ; (c) l'organe atteint du fait de la voie de pénétration du radionuclide dans l'organisme ; (d) la radiosensibilité de l'organe, par exemple, l'organe endommagé par la dose la plus faible. Théoriquement, on tient compte de toutes ces considérations en utilisant les facteurs EBR et les normes fondamentales (a), (b) et (c) du paragraphe II.2, mais il est évident que l'information qu'ils traduisent ne comprend pas beaucoup de détails en ce qui concerne la plupart des critères mentionnés plus haut. En fait, excepté pour quelques radionuclides, le cas (a) ci-dessus représente le facteur déterminant lors du choix de l'organe critique. Pour établir ces listes révisées, chaque radionuclide a été étudié individuellement. Pour quelques radionuclides, on a choisi avec raison jusqu'à 12 organes critiques, en calculant pour chaque organe la quantité admissible dans l'organisme et les CMA. Ils sont énumérés au tableau 1 avec, en caractères gras, l'organe critique (ou les organes critiques dans le cas où les CMA sont identiques) et les valeurs minimales des CMA. En regard de chaque isotope, on a porté d'abord les CMA relatives aux substances solubles, puis les CMA des substances insolubles. Les valeurs données pour les substances solubles sont classées par ordre de grandeur des $(CMA)_{eau}$, si bien que la première ligne dans ce groupe indique l'organe critique déterminé uniquement sur la base des $(CMA)_{eau}$. Les valeurs données pour les substances insolubles sont classées par ordre de grandeur des $(CMA)_{air}$. Les classements suivant les $(CMA)_{air}$ et les $(CMA)_{eau}$ peuvent varier dans quelques cas, aussi a-t-on indiqué, en caractères gras, la CMA la plus faible dans chaque groupe pour la signaler comme un niveau maximal admissible d'exposition professionnelle lors de l'exploitation d'une installation dans les conditions énoncées. On a donné les CMA pour quelques autres organes (appelés organes de référence dans le tableau 1), essentiellement pour permettre d'évaluer les CMA de mélanges de radionuclides ; ces valeurs ne représentent donc pas des niveaux admissibles, lorsque le radionuclide est seul, à moins qu'elles ne soient imprimées en caractères gras.

L'organisme entier est donné comme organe de référence pour tous les nuclides à l'exception de quelques nuclides du groupe des gaz rares. Ces valeurs sont mentionnées principalement en vue du calcul des CMA de mélanges, ainsi que pour vérifier le modèle simplifié à l'excès qui a été utilisé. Comme il a été indiqué en (e) de la page 10, ce modèle à un seul compartiment a été choisi pour représenter la rétention à long terme dans l'organe critique ; il peut donc ne pas représenter convenablement ce qui se passe dans d'autres organes. Le radium et le strontium, par exemple, sont des ostéotropes à long terme, mais le premier jour ou les deux premiers jours suivant l'ingestion, on en trouve des quantités appréciables dans le plasma et dans les tissus mous. Cette quantité est négligeable dans la mesure où l'on considère l'accumulation en 50 ans dans l'os, mais il convient de vérifier que la limite fixée pour l'organisme entier n'est pas dépassée du fait de la quantité présente dans le plasma et dans les tissus mous. Dans le cas d'un mélange qui peut contenir d'autres isotopes se concentrant principalement dans les tissus mous, la dose délivrée par cette fraction de la quantité totale retenue

ne doit pas être négligée. La CMA établie pour l'organisme entier permet également d'estimer facilement la dose intégrée, c'est-à-dire la dose délivrée à l'ensemble de l'organisme. Bien que les normes fondamentales ne limitent pas directement la dose intégrée, excepté dans le cas d'irradiation totale de l'organisme, celle-ci présente un intérêt considérable. Comme la limite fixée pour l'irradiation de l'organisme entier en cas d'exposition à niveau constant est fondée sur 5 rems/an (0,1 rem/semaine), l'organisme entier constitue parfois l'organe critique. Comme le tractus gastro-intestinal reçoit souvent une dose absorbée supérieure à celle reçue par n'importe quel autre organe, et comme il constitue souvent l'organe critique en cas d'exposition à un mélange de produits de fission, il est, à quelques exceptions près, mentionné comme organe de référence pour les radionuclides énumérés au tableau 1.

IV. CALCUL DES VALEURS D'EXPOSITION MAXIMALE ADMISSIBLE

1. *Bases d'estimation des valeurs d'exposition maximale admissible.* Comme il a été indiqué dans l'étude ci-dessus des normes fondamentales pour l'irradiation interne maximale admissible, on utilise généralement deux critères quelque peu différents pour la détermination des valeurs d'exposition maximale admissible : (a) pour les radionuclides ostéotropes tels que ^{90}Sr , ^{239}Pu , etc... qui émettent des quantités significatives de rayonnement particulaire, l'estimation est basée sur une comparaison avec ^{226}Ra et ses produits de filiation ; et, (b) pour tous les autres radionuclides, les valeurs des CMA et des quantités maximales admissibles dans l'organisme sont fixées de façon à limiter la dose EBR hebdomadaire reçue par les différents organes du corps*, par exemple à 0,1 rem/semaine pour les gonades et l'organisme entier, à 0,6 rem/semaine pour la peau et la thyroïde et à 0,3 rem/semaine pour tous les autres tissus mous. Ainsi, pour un radionuclide ostéotrope tel que ^{85}Sr qui n'émet que des rayonnements γ ou X, le calcul doit être basé sur une dose hebdomadaire de 0,3 rem puisque les tissus mous voisins sont irradiés sensiblement au même degré que l'os. La première méthode est le résultat d'un calcul établi pour déterminer : (i) la quantité (μCi) déposée dans l'os qui délivrera la même dose EBR effective que celle qui est délivrée par 0,1 μCi de ^{226}Ra et ses produits de filiation, et (ii) la quantité (μCi) déposée dans l'os qui entraînera des dommages comparables à ceux produits par des dépôts connus de ^{226}Ra dans l'os. Dans certains cas, cette méthode s'appuie sur une expérience clinique ou des études de dommage biologique assez approfondies, soit avec le radionuclide en question, soit avec un autre radionuclide ayant des propriétés chimiques similaires et un comportement métabolique semblable dans l'organisme. La méthode fondée sur le débit de dose EBR est généralement utilisée, lorsque ce n'est pas l'os qui constitue l'organe critique et lorsqu'on ne dispose pas de connaissances expérimentales directes. L'évidence biologique sur laquelle s'appuient les limites imposées par la dose EBR au niveau des divers organes du corps est moins directe que l'observation clinique ou les études de dommage biologique, mais elle est compatible avec ce que l'on sait d'une manière générale concernant le rayonnement émis aussi bien par des sources externes que par des sources internes.

* Dans le cas des radioisotopes à période longue de l'uranium, ce sont les effets toxiques qui limitent la quantité maximale admissible dans l'organisme.

2. *Détermination de la quantité de radionuclide admissible dans l'organisme par comparaison avec le radium.* Dans le cas de radionuclides émetteurs α et β se localisant dans l'os, la quantité maximale admissible dans l'organisme, q , est déterminée par comparaison directe avec ^{226}Ra . En 1941, un comité consultatif ⁽¹²⁾ du National Bureau of Standards (Bureau National de Normalisation) fixait pour la première fois la quantité maximale admissible dans l'organisme pour le radium à $0,1 \mu\text{g}$ ($\sim 0,1 \mu\text{Ci}$). L'homme possède des années d'expérience en ce qui concerne le radium; celui-ci peut donc servir de base pour le choix des quantités maximales admissibles dans l'organisme de radionuclides similaires se fixant dans l'os. Les peintres de cadrans à base de radium, les malades traités au radium et les personnes utilisant des eaux d'alimentation relativement riches en radium ⁽¹³⁾ ont fourni le meilleur exemple d'exposition permanente de l'homme pour observer les effets d'un radionuclide fixé dans l'organisme. Des études autoradiographiques ⁽¹⁴⁾ faites sur des prélèvements humains obtenus par autopsie ont montré que le radium est réparti irrégulièrement dans l'os, mais il est possible que d'autres radionuclides ostéotropes soient répartis encore moins uniformément ⁽¹⁵⁾. On sait, par des expériences faites sur des animaux ⁽¹⁶⁾, que certains radionuclides ostéotropes produisent dans l'os un dommage plus grand que ^{226}Ra et ceci pour la même dose EBR. Ce fait est attribué à plusieurs facteurs et notamment à : (a) une répartition non uniforme, (b) une radiosensibilité plus grande de la portion d'os dans laquelle l'isotope est fixé, et (c) un rôle plus essentiel du tissu endommagé. C'est pourquoi, dans les calculs des CMA, on introduit un facteur de dommage relatif, n , pour tenir compte à la fois de l'efficacité relative plus grande de certains radionuclides et du fait que beaucoup d'entre eux présentent dans l'os une répartition plus hétérogène que le radium. Dans la formule donnant l'énergie effective, $\sum E_i F_i (\text{EBR})_{i n_i}$, le facteur de dommage relatif, n , est pris égal à 1, si : (a) l'élément parent de la chaîne considérée est un isotope du radium, ou (b) la composante considérée de l'énergie est produite sous forme de rayonnement X ou γ . Le facteur de dommage relatif est pris égal à 5 dans tous les autres cas, c'est-à-dire si l'élément parent de la chaîne n'est pas un isotope du radium et si la composante considérée de l'énergie correspond à un rayonnement α , β^- , β^+ , e^- ou à un atome de recul. Ainsi, dans la chaîne de ^{228}Th , les deux premiers éléments sont $^{228}\text{Th} \xrightarrow{\alpha, \gamma} ^{224}\text{Ra} \xrightarrow{\alpha, \gamma}$ et n a une valeur égale à 5 pour les énergies de ces deux particules α . Dans la chaîne de $^{228}\text{Ra} \xrightarrow{\beta} ^{228}\text{Ac} \xrightarrow{\beta, \gamma} ^{228}\text{Th} \xrightarrow{\alpha, \gamma} ^{224}\text{Ra} \xrightarrow{\alpha, \gamma}$, les deux mêmes énergies α sont pondérées par le facteur $n = 1$. L'énergie γ est toujours pondérée par le facteur $n = 1$.

Quand on dispose des paramètres nécessaires, on peut déterminer la quantité maximale admissible dans l'organisme, q , d'un radionuclide par une étude comparative des symptômes cliniques et du dommage biologique produits par diverses quantités de ^{226}Ra et du radionuclide étudié. Les valeurs les plus directes et les plus sûres de q devraient être obtenues par des recherches sur l'exposition chronique — quelques études de ce genre sont actuellement en cours. Jusqu'à ce que ces études soient achevées, il faudra continuer à déterminer les valeurs de q par comparaison directe de l'énergie dissipée dans l'os par le radionuclide étudié avec l'énergie dissipée par $0,1 \mu\text{Ci}$ de ^{226}Ra et ses produits de filiation (avec une

EBR de 10), modifiée par le facteur n . Dans ce cas, la valeur de q est donnée par l'équation :

$$q = \frac{q^{\text{Ra}} f_2^{\text{Ra}}}{f_2} \times \frac{\epsilon^{\text{Ra}}}{\epsilon} = \frac{0,1 (0,99)}{f_2} \times \frac{110}{\epsilon} = \frac{11}{f_2 \epsilon} \quad (1)$$

dans laquelle :

- $q^{\text{Ra}} = 0,1 \mu\text{Ci}$, est la quantité maximale admissible de ^{226}Ra dans l'organisme.
- f_2 = rapport de la quantité de radionuclide dans le squelette à celle présente dans l'organisme entier.
- $f_2^{\text{Ra}} = 0,99$, est la valeur de f_2 pour le radium.
- ϵ = énergie effective absorbée par désintégration pour un radionuclide = $\Sigma EF(\text{EBR}) n$; $\epsilon^{\text{Ra}} = 110$, est la valeur de ϵ pour le radium ;
- E = énergie (MeV) dissipée dans le squelette par désintégration ;
- EBR = efficacité biologique relative = 1 pour les rayonnements X, γ , β^- , β^+ , e^- (ce facteur est pris égal à 1,7 si l'énergie maximale $E_m \leq 0,03$ MeV pour les rayonnements β^- , β^+ ou e^-), 10 pour le rayonnement α et 20 pour les atomes de recul.
- F = rapport du nombre de désintégrations du produit de filiation au nombre de désintégrations de l'élément parent. Voir paragraphe V.1.

On admet que 99 p. 100 du radium dans l'organisme sont fixés dans le squelette et que l'énergie totale dissipée dans le squelette par désintégration de ^{226}Ra plus 30 p. 100 de ses produits de filiation ⁽¹⁸⁾ ⁽¹⁹⁾ est de 11 MeV ; l'énergie effective dissipée dans le squelette est donc $\Sigma EF(\text{EBR})n = 110$.* Pour d'autres radionuclides localisés dans l'os, l'énergie effective absorbée est obtenue à partir de $\Sigma EF(\text{EBR}) n$.

Ainsi, la présence dans l'organisme de $0,1 \mu\text{Ci}$ de ^{226}Ra et de ses produits de filiation entraîne au niveau de l'os un débit moyen de dose absorbée de 0,06 rad/semaine ou un débit moyen de dose de 0,56 rem/semaine. Comme il a été indiqué ci-dessus, lors de l'établissement de ces débits de dose pour ^{226}Ra , le facteur n a été pris égal à 1. La répartition du radium dans l'os n'est pas uniforme ⁽¹⁴⁾ et s'il existe, par exemple, des portions de l'os dans lesquelles le radium s'est concentré, le débit de dose dans ces zones peut atteindre plusieurs fois les valeurs moyennes. Les valeurs données pour le débit de dose EBR sont fondées sur l'hypothèse que $(\text{EBR})_\alpha = 10$. De nombreuses expériences ⁽²⁰⁾ indiquent que le facteur $(\text{EBR})_\alpha$ est très inférieur à 10 en ce qui concerne le dommage biologique résultant d'une exposition aiguë — il se pourrait qu'il ne soit pas supérieur à 1,4 — mais pour ce qui est du dommage biologique résultant d'expositions chroniques, on a signalé ⁽²¹⁾

* Dans le rapport de 1955 de la CIPR ⁽²⁾ on avait donné une valeur de 162 MeV ; celle-ci a été remplacée, dans l'édition de 1958, par la valeur de 110 MeV. La réduction à 110 MeV résulte de l'utilisation des données plus récentes de NORRIS ⁽¹⁸⁾ d'après lesquelles 30 p. 100 des produits de filiation de ^{226}Ra sont retenus dans l'os. La valeur de 162 MeV avait été obtenue en utilisant les données plus anciennes de EVANS ⁽¹⁹⁾ qui admettaient une rétention de 55 p. 100 des produits de filiation de ^{226}Ra . Le calcul de cette énergie effective absorbée est donné en détail au paragraphe V.1.

que des valeurs bien plus élevées pouvaient s'appliquer. C'est pourquoi, il serait imprudent d'utiliser une valeur $(EBR)_a < 10$ avant de disposer de données plus nombreuses recueillies lors d'expositions chroniques. D'après l'expérience acquise avec le radium, en médecine et dans l'industrie, il semble bien plus justifié de prendre comme référence de base pour l'exposition professionnelle admissible, une quantité de $0,1 \mu\text{Ci}$ de ^{226}Ra et la dose EBR qu'elle délivre au niveau de l'os, plutôt qu'un débit de dose quelconque choisi arbitrairement pour un organe particulier. Il serait difficile, actuellement, de dire ce qui est plus nocif pour l'homme : (a) le débit de dose de $0,1 \text{ rem/semaine}$ délivré à l'organisme entier ou (b) le débit de dose délivré à l'os du fait de la présence de $0,1 \mu\text{Ci}$ de ^{226}Ra dans l'organisme. Il est certain que, si la plus grande partie du système hématopoïétique était irradiée, du fait, par exemple, de la présence simultanée de ^{210}Po qui se fixe électivement dans la rate et de ^{226}Ra qui est ostéotrope, le dommage biologique serait plus grand que si une partie de ce système seulement était irradiée. On a montré ⁽⁸⁾ que, dans quelques cas, lorsque plusieurs organes du corps sont irradiés simultanément, il en résulte un effet synergique. Il est donc presque certain qu'un débit de dose de $0,1 \text{ rem/semaine}$ délivré à l'os est moins nocif qu'un débit de dose de $0,1 \text{ rem/semaine}$ délivré à l'organisme entier, mais on manque actuellement de données quantitatives suffisantes pour savoir si un débit de dose moyen de $0,56 \text{ rem/semaine}$ au niveau de l'os (avec, peut-être, localement un débit de dose bien plus élevé) produit un dommage plus ou moins grand qu'un débit de dose de $0,1 \text{ rem/semaine}$ au niveau de l'organisme entier.

Le principal risque pour des malades traités avec des doses importantes de radium et pour les peintres de cadrans au radium est le développement de tumeurs osseuses de nombreuses années après l'exposition (de 10 à 35 ans). Bien qu'il n'ait pas été observé de tumeurs chez des personnes dont l'organisme contenait une quantité de radium de seulement $0,1 \mu\text{Ci}$, il est possible que le facteur de sécurité ne soit pas égal à 10, car des tumeurs sont apparues chez des personnes dont l'organisme renfermait une quantité de radium inférieure à $1 \mu\text{Ci}$ au moment où la tumeur était dépistée pour la première fois. Cependant, dans tous ces cas, la quantité initiale de radium dans l'organisme avait été plus grande qu'elle ne l'était au moment du dépistage de la tumeur. En outre, la dose absorbée intégrée reçue par les peintres de cadrans au radium avait été, dans la plupart des cas, accrue par la présence d'une quantité importante de mésothorium (^{228}Ra) dans les substances ingérées. Les CMA indiquées pour les radionuclides à période longue dans le tableau 1 comprennent un facteur supplémentaire de sécurité, puisque la quantité maximale admissible de radionuclide dans l'organisme n'est atteinte qu'après une exposition prolongée aux CMA (voir paragraphe III.1). Pour les radionuclides (tableau 2) ayant une période effective longue, tels que ^{226}Ra , ^{230}Th , ^{232}Th , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{243}Am , ^{246}Cm , etc..., la quantité maximale admissible dans l'organisme n'est atteinte qu'après 50 ans d'exposition professionnelle continue. Plusieurs chercheurs ⁽²²⁾ ont décrit des modifications dans la densité du squelette et/ou des modifications histopathologiques dans l'os de patients dont l'organisme renfermait une quantité égale ou inférieure à $0,1 \mu\text{Ci}$ de radium ; on peut s'attendre à voir apparaître d'autres modifications pathologiques à mesure que ces individus vieilliront. Ce problème continuera à être étudié de façon

permanente et on sera peut-être amené ultérieurement, après avoir recueilli davantage de données sur les effets chroniques du radium et d'autres radionuclides ostéotropes, à abaisser la référence fondamentale de $0,1 \mu\text{Ci}$ de ^{226}Ra . Il semble, toutefois, qu'actuellement cette modification ne soit pas justifiée pour les raisons suivantes : (a) le radium n'irradie pas le système hématopoïétique tout entier ; (b) la présence dans l'organisme de $0,1 \mu\text{Ci}$ de ^{226}Ra entraîne sans doute des modifications décelables dans l'os, mais n'a jamais provoqué, à notre connaissance, de dommage grave (atteinte manifeste de l'individu) ; (c) le principal dommage reconnaissable dû à ^{226}Ra est la production de tumeurs osseuses, mais la quantité la plus faible dont la présence dans l'organisme a entraîné une tumeur, est $0,5 \mu\text{Ci}$ (²³) ; (d) toutes les tumeurs provoquées par le radium sont apparues chez des personnes dont l'organisme renfermait initialement des quantités de radium bien plus grandes que celles présentes au moment de la découverte des tumeurs ; (e) la plupart des tumeurs osseuses observées chez les peintres de cadrans au radium peuvent être attribuées à $^{226}\text{Ra} + ^{228}\text{Ra}$, auquel cas la dose EBR intégrée était bien plus forte que celle déduite de la quantité de ^{226}Ra présente dans l'organisme au moment de la découverte des tumeurs ; (f) pour un radionuclide ostéotrope, la quantité maximale admissible dans l'organisme correspondant à $0,1 \mu\text{Ci}$ de ^{226}Ra n'est atteinte que dans le cas d'exposition professionnelle continue aux CMA. Pour les radionuclides ostéotropes les plus dangereux, cette quantité n'est atteinte qu'après une exposition professionnelle continue de 50 ans aux CMA.

3. *Quantité maximale admissible dans l'organisme, établie sur la base d'un débit de dose EBR admissible au niveau de l'organe critique.* En l'absence de renseignements expérimentaux précis permettant de déterminer des valeurs sûres pour les quantités admissibles dans l'organisme de radionuclides qui ne se localisent pas dans l'os, les valeurs des CMA et de q ont été calculées en postulant qu'une quantité maximale admissible est la quantité qui, répartie dans tout l'organisme, délivrera le débit de dose EBR maximal admissible à l'organe critique. Les débits de dose EBR maximaux admis pour les différents organes sont énumérés au paragraphe II.2. Il faut souligner que ces débits de dose EBR maximaux admissibles sont des moyennes établies sur un trimestre. On peut s'attendre à des variations de ces débits dans des intervalles de temps assez courts et ces variations peuvent être tolérées. Comme il a été expliqué au paragraphe II.2, le débit de dose moyen de $0,1 \text{ rem/semaine}$ et les valeurs correspondantes des CMA pour une exposition professionnelle des gonades ou de l'organisme entier peuvent être multipliées, pendant une période de 13 semaines, par un facteur allant jusqu'à 2,4 pourvu que la dose à un âge quelconque N ne dépasse pas celle donnée par la formule $5 (N - 18)$ et qu'un contrôle adéquat soit effectué pour établir avec certitude que la dose en 13 semaines ne dépasse pas 3 rems.

Dans l'étude ci-dessous, la répartition de l'isotope dans l'organisme est caractérisée par les paramètres suivants :

- f_1 = fraction des radionuclides ingérés qui passe dans le sang,
- f'_2 = fraction de nuclide passant du sang dans l'organe de référence,
- $f_e = f_1 f'_2$ (voir paragraphe V.3),

f_a = fraction de la quantité de radionuclide inhalée arrivant à l'organe de référence (voir paragraphe V.3),

f_2 = fraction de la quantité totale dans l'organisme retenue dans l'organe de référence (voir paragraphe V.3).

L'équation donnant la quantité maximale admissible dans l'organisme, q , à partir d'un débit de dose maximal admissible R rems/semaine est :

$$q = \frac{100 \, m \cdot R}{3,7 \cdot 10^4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-6} \cdot 6,05 \cdot 10^5 f_2 \varepsilon} \quad (2)$$

$$q = \frac{2,8 \cdot 10^{-3} \, m \, R}{f_2 \varepsilon} \quad (3)$$

d'où, quand $R = 0,3$ rem/semaine

$$q = \frac{8,4 \times 10^{-4} \, m}{f_2 \varepsilon} \quad (4)$$

où : $3,700 \times 10^4 = \text{dés./s par } \mu\text{Ci}$;

$1,6 \times 10^{-6} = \text{ergs/MeV}$;

$6,05 \times 10^5 = \text{s/semaine}$;

$100 = \text{ergs/g par rad}$;

m = masse de l'organe de référence (grammes) ;

et ε est défini de même que dans l'équation (1).

4. *Concentrations dans l'air et dans l'eau — établies d'après le modèle exponentiel — pour des organes critiques autres que le tractus gastro-intestinal (TGI).* Les concentrations maximales admissibles dans l'air et dans l'eau du tableau 1 ont été calculées pour la plupart des radionuclides en admettant que les substances radioactives parviennent à l'organe critique à raison de $P \, \mu\text{Ci/jour}$ et en sont éliminées selon une loi exponentielle simple. Cette relation s'exprime par l'équation :

$$\frac{d(qf_2)}{dt} + \lambda(qf_2) = P \quad (5)$$

Si $qf_2 = 0$ lorsque $t = 0$, la solution est :

$$qf_2 = P(1 - e^{-\lambda t})/\lambda \quad (6)$$

où qf_2 = quantité de radionuclide dans l'organe critique (μCi) ;

f_2 = fraction de la quantité de radionuclide dans l'organisme entier retenue dans l'organe critique ;

λ = constante de décroissance effective = $0,693/T$;

T = période effective $(T_r \, T_b)/(T_r + T_b)$ (jours) ;

T_r = période radioactive (jours) ;

T_b = période biologique (jours) ;

t = temps d'exposition ; pour l'exposition professionnelle $t = 50$ ans (dans les publications antérieures du CNPR ⁽¹⁾ et de la CIPR ⁽²⁾, t avait été fixé à 70 ans) ;

P = taux d'absorption du radionuclide par l'organe critique ($\mu\text{Ci}/\text{jour}$) = $(M)S$, où M est la concentration ($\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$) du radionuclide dans l'eau ingérée ou dans l'air inhalé, et S le produit du taux moyen d'absorption (cm^3/jour) d'eau ou d'air par la fraction de radioélément qui parvient à l'organe critique. Pour une exposition professionnelle à la concentration maximale admissible (CMA) du radionuclide dans l'eau, $M = (\text{CMA})_{\text{eau}}$ et dans l'air, $M = (\text{CMA})_{\text{air}}$. En un jour de 24 heures, l'homme standard (voir paragraphe V.2 les caractéristiques de l'homme standard) consomme 2200 cm^3 d'eau et inhale $2 \times 10^7 \text{ cm}^3$ d'air. En raison de son activité plus intense au cours des 8 heures de travail de la journée, on admet qu'il ingère ou inhale pendant la période de travail la moitié de ces quantités, soit 1100 cm^3 d'eau et 10^7 cm^3 d'air. Le régime de travail pour l'homme standard est de 8 heures/jour, 5 jours/semaine et 50 semaines/an. Il en résulte pour l'exposition professionnelle moyenne : $S = 1100 \times 5/7 \times 50/52 f_e = 750 f_e \text{ cm}^3$ d'eau par jour et $S = 10^7 \times 5/7 \times 50/52 f_a = 6,9 \times 10^6 f_a \text{ cm}^3$ d'air par jour.

Les formules données dans ce paragraphe sont toutes fondées sur un temps d'exposition de 40 heures/semaine, lorsque des données spécifiques concernant le temps sont nécessaires. Pour l'exposition professionnelle continue, les valeurs des CMA doivent être divisées par $2 \times 365/(5 \times 50) = 2,92$, excepté dans les cas d'immersion où elles doivent être divisées par $3 \times 365/(5 \times 50) = 4,38$. En remplaçant P et λ dans l'équation (6) par les valeurs indiquées ci-dessus, les CMA sont données par :

$$(\text{CMA})_{\text{air}} = \frac{10^{-7} q f_2}{T f_a (1 - e^{-0,693 t/T})} \quad \mu\text{Ci}/\text{cm}^3 \quad (7)$$

et

$$(\text{CMA})_{\text{eau}} = \frac{9,2 \cdot 10^{-4} q f_2}{T f_e (1 - e^{-0,693 t/T})} \quad \mu\text{Ci}/\text{cm}^3 \quad (8)$$

T = période effective (jours) ;

t = temps d'exposition (jours).

Si le radionuclide se désintègre en donnant naissance à un ou plusieurs produits de filiation, il faut tenir compte correctement de la contribution à la dose EBR fournie par les radionuclides de filiation formés dans l'organisme. Les formules (7) et (8) peuvent être modifiées de telle façon qu'elles restent correctes dans le cas d'une chaîne de radionuclides, parent — produits de filiation. Il suffit pour cela d'ajouter à l'énergie effective de l'élément parent, celle de chaque produit de filiation pondérée par la fréquence des désintégrations de ce dernier pour une désintégration de l'élément parent. Ce rapport définit le facteur F_i , c'est-à-dire :

$$F_i = \frac{\mu\text{Ci du } i^{\text{e}} \text{ produit de filiation dans l'organe}}{\mu\text{Ci de l'élément parent dans l'organe}}$$

Ainsi, dans le cas ⁽²⁴⁾ d'une absorption unique, si $P \mu\text{Ci}$ du radionuclide parent pénètrent dans l'organe critique à l'instant $t = 0$, la quantité $(q f_2)_i^s$ du i^{e} produit de filiation contenue dans l'organe au temps t est donnée par l'équation :

$$(q f_2)_0^s = P e^{-\lambda_0 t}$$

$$(q f_2)_1^s = P \lambda_1^r \frac{e^{-\lambda_0 t}}{\lambda_1 - \lambda_0} + \frac{e^{-\lambda_1 t}}{\lambda_0 - \lambda_1}$$

$$(q f_2)_2^s = P \lambda_1^r \lambda_2^r \left[\frac{e^{-\lambda_0 t}}{(\lambda_1 - \lambda_0)(\lambda_2 - \lambda_0)} + \frac{e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_0 - \lambda_1)(\lambda_2 - \lambda_1)} + \frac{e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_0 - \lambda_2)(\lambda_1 - \lambda_2)} \right]$$

La formule générale s'écrit :

$$(q f_2)_i^s = P \left[\prod_{j=1}^i \lambda_j^r \right] \sum_{\substack{h=0 \\ p=h \\ p \neq h}}^i \frac{e^{-\lambda_h t}}{\lambda_p - \lambda_h} \quad (9)$$

Dans cette formule $\left[\prod_{j=1}^i \lambda_j^r \right]$ représente le produit $\lambda_1^r \times \lambda_2^r \times \dots \times \lambda_i^r$.

En convenant que pour $i = 0$, le terme $\left[\prod_{j=1}^0 \lambda_j^r \right]$ est égal à 1, la formule générale (9)

s'applique aussi bien à la quantité de radionuclide parent présente dans l'organisme qu'à celle des produits de filiation. Dans le développement ci-dessous, l'indice 0, comme dans $\lambda_0^r = 0,693/T_0^r$, etc..., se rapporte toujours au radioisotope parent, tandis que l'indice i désigne les constantes de décroissance du i^{e} produit de filiation.

Dans le cas d'une absorption continue du radionuclide parent telle que $P \mu\text{Ci}/\text{jour}$ du radionuclide parent pénètrent dans l'organe critique, la quantité $(q f_2)_i$ du i^{e} produit de filiation contenue dans l'organe au temps t est donnée par l'équation :

$$(q f_2)_0 = P (1 - e^{-\lambda_0 t})/\lambda_0$$

$$(q f_2)_1 = P \lambda_1^r \left[\frac{(1 - e^{-\lambda_0 t})}{\lambda_0 (\lambda_1 - \lambda_0)} + \frac{(1 - e^{-\lambda_1 t})}{\lambda_1 (\lambda_0 - \lambda_1)} \right]$$

$$(q f_2)_2 = P \lambda_1^r \lambda_2^r \left[\frac{(1 - e^{-\lambda_0 t})}{\lambda_0 (\lambda_1 - \lambda_0) (\lambda_2 - \lambda_0)} + \frac{(1 - e^{-\lambda_1 t})}{\lambda_1 (\lambda_0 - \lambda_1) (\lambda_2 - \lambda_1)} + \frac{(1 - e^{-\lambda_2 t})}{\lambda_2 (\lambda_0 - \lambda_2) (\lambda_1 - \lambda_2)} \right]$$

La formule générale est :

$$(q f_2)_i = \int_0^t (q f_2)_i^s dt = P \left[\prod_{j=1}^i \lambda_j^r \right] \sum_{\substack{h=0 \\ p=h \\ p \neq h}}^i \frac{1 - e^{-\lambda_h t}}{\lambda_p - \lambda_h} \quad (10)$$

Il faut noter que l'équation (6) représente un cas particulier de l'équation (10), si l'on convient de remplacer le terme $\left[\prod_{j=1}^i \lambda_j' \right]$ par 1 pour $i = 0$.

Le débit de dose en rems/semaine au niveau de l'organe critique, résultant de l'absorption et de la fixation continues du radionuclide parent ainsi que de la croissance des produits de filiation dans l'organe critique, est donné par l'équation :

$$R = \sum_{i=0}^k (q f_2)_i \frac{3,7 \cdot 10^4 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 7 \cdot 1,6 \cdot 10^{-6} E_i (EBR)_i n_i}{100 m} \text{ rems/semaine} \quad (11)$$

dans laquelle m est la masse de l'organe critique et $E_i (EBR)_i n_i$ l'énergie effective correspondant à une désintégration d'un atome du i^e produit de filiation. Le facteur P est pris égal à $6,9 \cdot 10^6 \cdot (CMA)_{\text{air}} f_a$ pour l'inhalation et à $750 (CMA)_{\text{eau}} f_e$ pour l'ingestion, et, comme ce facteur P se retrouve dans chacun des termes $(q f_2)$ de l'équation (11) et que $(q f_2)_0 = P (1 - e^{-\lambda_0 t}) / \lambda_0$, on a :

$$\begin{aligned} (CMA)_{\text{air}} &= \frac{4,1 \cdot 10^{-10} m R}{f_a \sum_{i=0}^k (q f_2)_i E_i (EBR)_i n_i / P} \mu\text{Ci/cm}^3 \\ &= \frac{4,1 \cdot 10^{-10} m R \lambda_0}{f_a (1 - e^{-\lambda_0 t}) \sum_{i=0}^k E_i F_i (EBR)_i n_i} \mu\text{Ci/cm}^3 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} (CMA)_{\text{eau}} &= \frac{3,7 \cdot 10^{-6} m R}{f_e \sum_{i=0}^k (q f_2)_i E_i (EBR)_i n_i / P} \mu\text{Ci/cm}^3 \\ &= \frac{3,7 \cdot 10^{-6} m R \lambda_0}{f_e (1 - e^{-\lambda_0 t}) \sum_{i=0}^k E_i F_i (EBR)_i n_i} \mu\text{Ci/cm}^3 \end{aligned} \quad (13)$$

où $F_0 = 1$ et $F_i = (q f_2)_i / (q f_2)_0$. Dans les équations (12) et (13), R est le débit de dose admissible pour l'organe considéré, en rems/semaine. Ainsi, lorsqu'il existe un rayonnement particulaire, $R = 0,56$ quand l'os constitue l'organe critique et $R = 0,3$ pour tous les autres organes, excepté dans le cas de la thyroïde où $R = 0,6$ ainsi que dans celui de l'organisme entier ou des gonades où $R = 0,1$. La somme pondérée des énergies $\sum E_i F_i (EBR)_i n_i$ correspondant aux chaînes et les fractions F_i sont indiquées dans le tableau 5a. Dans tous les organes autres que l'os, n_i est pris égal à 1. Les équations (12) et (13) sont établies pour 40 heures/semaine. Les formules correspondantes pour 168 heures/semaine, c'est-à-dire pour une exposition continue, sont obtenues en remplaçant respectivement les constantes $4,1 \cdot 10^{-10}$ et $3,7 \cdot 10^{-6}$ par $1,4 \cdot 10^{-10}$ et $1,3 \cdot 10^{-6}$.

5. *Concentrations dans l'air et dans l'eau établies sur la base de la dose EBR délivrée à divers segments du tractus GI.* Lorsque l'organe critique considéré est le tractus gastro-intestinal (TGI), la quantité (μCi) du i^{e} produit de filiation présente à l'instant t est donnée par des formules analogues à l'équation (9), mais comme les substances parcourent les intestins à des vitesses quelque peu différentes, la formule (11) exige une correction. Si τ est le temps total de transit dans une portion du tractus GI, par exemple le gros intestin supérieur, la fraction du contenu total qui passe en un intervalle de temps $d\tau$ par une section transversale donnée est, en moyenne, $d\tau/\tau$. La masse de cette substance est donc $(d\tau/\tau) \cdot m$, m étant la masse totale du contenu de la portion considérée. En première approximation, l'énergie est absorbée dans cette masse. Ainsi, lorsqu'il y a ingestion continue de $P \mu\text{Ci/jour}$, le débit de dose en rems/semaine délivré aux parois du tractus GI situées au voisinage de l'endroit étudié, est donné par :

$$R = \sum_{i=0}^k (q f_2)_i^{\text{total}} \frac{3,7 \cdot 10^4 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 7 \cdot 1,6 \cdot 10^{-6} \varepsilon_i d\tau}{2 \cdot 100 m \cdot d\tau/\tau} \text{ rems/semaine} \quad (14)$$

Dans le cas d'un isotope sans produits de filiation, la valeur de la $(\text{CMA})_{\text{air}}$ est donnée par :

$$(\text{CMA})_{\text{air}} = \frac{8,2 \cdot 10^{-10} m R}{f_a \tau \varepsilon_0 e^{-\lambda_0 t}} \mu\text{Ci/cm}^3 \quad (15)$$

et la valeur de la $(\text{CMA})_{\text{eau}}$ par :

$$(\text{CMA})_{\text{eau}} = \frac{7,4 \cdot 10^{-6} m R}{\tau \varepsilon_0 e^{-\lambda_0 t}} \mu\text{Ci/cm}^3 \quad (16)$$

Si le radionuclide considéré est l'élément parent d'une chaîne de k produits de filiation, la formule correspondante pour $(\text{CMA})_{\text{air}}$ est :

$$(\text{CMA})_{\text{air}} = \frac{8,2 \cdot 10^{-10} m R}{\tau f_a \sum_{i=0}^k \frac{(q f_2)_i^{\text{total}}}{P} \varepsilon_i} \mu\text{Ci/cm}^3 \quad (15')$$

et la valeur de $(\text{CMA})_{\text{eau}}$ est donnée par

$$(\text{CMA})_{\text{eau}} = \frac{7,4 \cdot 10^{-6} m R}{\tau \sum_{i=0}^k \frac{(q f_2)_i^{\text{total}}}{P} \varepsilon_i} \mu\text{Ci/cm}^3 \quad (16')$$

Les valeurs des constantes biologiques utilisées pour les différentes parties du tractus GI sont indiquées dans le tableau 11. Comme il y a également des produits de filiation qui pénètrent dans l'intestin grêle et dans le gros intestin, chacun de ces produits de filiation donne naissance à son tour à une chaîne secondaire ; $(q f_2)_i^s$ doit donc être calculé à l'aide de l'équation (9) pour toutes ces chaînes secondaires et les résultats additionnés pour obtenir la quantité de i^{e} produit de filiation dans l'organe considéré. Cette quantité sera désignée par $(q f_2)_i^{\text{total}}$. Dans les formules (14) à (19'), on a introduit un facteur $1/2$ pour tenir compte du fait que la dose délivrée à la paroi intestinale n'est égale, en moyenne, qu'à la moitié de la dose délivrée au contenu du tractus GI. Dans les équations (15') et (16'), $(q f_2)_i^{\text{total}}$ représente la quantité du i^{e} isotope (μCi) (équation 9), et

les formules ont été établies sous cette forme. On peut ainsi se passer des facteurs F_i et comme le facteur de dommage relatif $n_i = 1$ pour le tractus GI, l'énergie effective est réduite à $\varepsilon_i = \Sigma E$ (EBR) qui est indiqué dans les tableaux 5 et 5a. Des expériences ⁽²⁵⁾ ont montré que les particules α ne pénètrent pas dans la muqueuse de manière appréciable. C'est pourquoi, le Comité a décidé de n'introduire que 1 p. 100 de l'énergie des particules α dans le calcul des énergies effectives, $\Sigma \varepsilon_i$, pour le tractus GI. Pour calculer $(q f_2)_i^{\text{total}}$, on admet qu'il n'y a aucune absorption de substance à partir du gros intestin et, par conséquent, $\lambda_i^b = 0$ et $\lambda_i = \lambda_i^r$ dans ces portions du tractus. On fait la même hypothèse pour l'estomac. Dans l'intestin grêle, une fraction f_1 est absorbée et on prend une valeur λ_i^b telle que l'absorption à ce taux constant pendant le temps de transit entraîne une absorption totale égale à la fraction f_1 de la substance. Les équations (15) et (16) s'appliquent, lorsque la portion critique du tractus GI est constituée par l'intestin grêle, IG, le gros intestin supérieur, GIS, ou le gros intestin inférieur, GII. Comme le gros intestin supérieur et le gros intestin inférieur ont le même diamètre, l'énergie effective est égale pour ces deux sections. Cette valeur commune est donnée dans les tableaux 5 et 5a comme valeur pour le gros intestin, GI. Les calculs sont légèrement différents dans le cas de l'estomac, E, puisqu'on admet que les substances ingérées restent dans l'estomac pendant 1 heure. Ainsi, la dose délivrée à l'estomac est donnée par l'équation :

$$R = \sum_{i=0}^k \int_0^{1/24} \frac{(q f_2)_i^s \cdot 3,7 \cdot 10^4 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 7 \cdot 1,6 \cdot 10^{-6} \varepsilon_i d\tau}{2 \cdot 100 m} \text{ rems/semaine} \quad (17)$$

Dans le cas d'un isotope sans produits de filiation, la valeur de la $(CMA)_{\text{air}}$ est donnée par :

$$(CMA)_{\text{air}} = \frac{2,5 \cdot 10^{-10} m \lambda_0}{f_a \varepsilon_0 (1 - e^{-\lambda_0/24})} \mu\text{Ci/cm}^3 \quad (18)$$

et la valeur de la $(CMA)_{\text{eau}}$ est donnée, dans ce cas, par :

$$(CMA)_{\text{eau}} = \frac{2,2 \cdot 10^{-6} m \lambda_0}{\varepsilon_0 (1 - e^{-\lambda_0/24})} \mu\text{Ci/cm}^3 \quad (19)$$

Si le radionuclide considéré est l'élément parent d'une chaîne de k produits de filiation et si l'estomac constitue le tissu critique, la formule correspondante pour la $(CMA)_{\text{air}}$ est :

$$(CMA)_{\text{air}} = \frac{2,5 \cdot 10^{-10} m}{f_a \sum_{i=0}^k \varepsilon_i \left[\prod_{j=1}^i \lambda_j^r \right]} \sum_{h=0}^i \frac{(1 - e^{-\lambda_h/24})}{\lambda_h \prod_{\substack{p=0 \\ p \neq h}}^i (\lambda_p - \lambda_h)} \mu\text{Ci/cm}^3 \quad (18')$$

et la valeur de la $(CMA)_{\text{eau}}$, lorsque l'estomac constitue le tissu critique, est :

$$(CMA)_{\text{eau}} = \frac{2,2 \cdot 10^{-6} m}{\sum_{i=0}^k \varepsilon_i \left[\prod_{j=1}^i \lambda_j^r \right]} \sum_{h=0}^i \frac{(1 - e^{-\lambda_h/24})}{\lambda_h \prod_{\substack{p=0 \\ p \neq h}}^i (\lambda_p - \lambda_h)} \mu\text{Ci/cm}^3 \quad (19')$$

La notation adoptée dans les formules (18) à (19') est en accord avec la notation de la formule (10) sur laquelle ces formules sont fondées. Cependant, comme nous l'avons expliqué ci-dessus, il n'y a aucune absorption dans l'estomac de telle sorte que $\lambda_i^b = 0$ et, par conséquent, dans les formules (18) à (19'), λ_i est égal à λ_i^r , autrement dit : $\lambda_i = \lambda_i^r + \lambda_i^b = \lambda_i^r + 0 = \lambda_i^r$. Pour quelques isotopes, le débit de dose au niveau de la paroi intestinale passe par une valeur maximale pendant le temps de transit à travers le tractus GI ; pour déterminer l'ingestion maximale admissible, il faut donc déterminer ce maximum et le prendre égal à 0,3 rem/semaine. L'emploi des formules d'ingestion unique pour $(q f_2)_i^s$ et $(q f_2)_i^{\text{total}}$ dans les équations (14) à (19') au lieu des formules d'ingestion continue donnant la quantité de radionuclide présente dans l'organe, utilisées dans les équations (10) à (13), résulte du fait que, suivant notre hypothèse d'une progression continue à vitesse uniforme à travers chaque portion du tractus, l'isotope ne s'accumule jamais dans le tractus GI ; par conséquent, la dose en un point atteint au temps t après l'ingestion de la substance est tout à fait indépendante des substances qui ont été ingérées avant l'instant $t = 0$ ou après l'instant $t = 0$. Il s'agit là, naturellement, d'une simplification poussée à l'extrême, puisqu'une portion du tractus GI peut être irradiée par un rayonnement γ quelconque émis dans l'organisme et peut-être même par quelques rayonnements β émis dans d'autres portions du tractus. On en tient compte dans une large mesure lors de l'évaluation des énergies effectives, ε_i , qui sont calculées pour chaque section du tractus prise comme un tout et non seulement pour une très petite portion du tractus.

6. *Concentration maximale admissible de radionuclides des gaz rares et d'autres gaz relativement inertes.* Lorsqu'on considère des gaz inertes tels que ^{41}A et ^{135}Xe , les calculs ne sont pas fondés sur la dose due à la concentration des substances radioactives dans l'organisme, mais plutôt sur la dose que la personne recevrait, si elle était entourée d'un nuage demi-sphérique infini de gaz radioactif. Il est vraisemblable que, dans ce cas, le rayonnement émis par le nuage radioactif délivrerait une dose bien plus élevée que celle due au gaz retenu dans les poumons ou dans d'autres organes du corps. On suppose donc que l'organisme est irradié sous un demi-angle solide par ce nuage radioactif de grand volume.

Dans ces conditions, la concentration maximale admissible d'un gaz inerte est donnée par :

$$(\text{CMA})'_{\text{air}} = \frac{0,024 R}{\Sigma(E)} \varrho_a P_a/P_t \mu\text{Ci/cm}^3 \quad (20)$$

Lorsque le débit de dose maximal admissible R est de 0,1 rem/semaine

$$(\text{CMA})'_{\text{air}} = \frac{2,6 \times 10^{-6}}{\Sigma(E)} \mu\text{Ci/cm}^3 \quad (21)$$

où ϱ_a = densité de l'air (= 0,0012 g/cm³)

P_a/P_t = rapport du pouvoir d'arrêt de l'air à celui du tissu ; $P_a/P_t = 1/1,13$ pour les rayonnements β et les électrons secondaires produits par les rayonnements X et γ

$\Sigma(E)$ = énergie effective par désintégration (MeV) ; dans ce cas, EBR = 1 et $n = 1$

$(\text{CMA})'_{\text{air}}$ = concentration maximale admissible ($\mu\text{Ci/cm}^3$) dans un grand

nuage de gaz qui entraînera une irradiation à un débit de 0,1 rem/semaine.*

L'équation (21) s'applique seulement dans le cas de grands nuages de gaz rares ou d'autres gaz relativement inertes émettant un rayonnement γ ou un rayonnement β de haute énergie ($E_m \geq 0,1$ MeV). Cette équation convient pour l'exposition professionnelle (c'est-à-dire 40 heures/semaine) et dans le cas où une personne est entourée d'un nuage demi-sphérique infini de substance radioactive émettant un rayonnement γ , X ou β d'énergie suffisante pour constituer essentiellement une exposition de l'organisme entier et nécessiter la limitation du débit de dose à 0,1 rem/semaine.

La formule ci-dessus n'a pas été utilisée pour les gaz rares qui sont principalement émetteurs α , tels que ^{222}Rn et ^{220}Rn , ou pour d'autres gaz relativement inertes qui émettent un rayonnement β de faible énergie ($\leq 0,1$ MeV), tels que $^3\text{H}_2$, puisque le rayonnement ne pénétrerait pas dans la couche épidermique protectrice de peau qui entoure l'organisme. Dans le cas d'un tel rayonnement de faible énergie, on peut encore appliquer la formule (20) à condition de prendre $R = 0,6$ rem/semaine. Ces cas sont indiqués dans le tableau 1 avec la mention « immersion », et « peau » comme organe de référence. Des expériences ont montré que lorsque HTO est présent dans l'air, sous forme de vapeur, des quantités sensiblement égales de ce composé pénètrent dans l'organisme par inhalation et par absorption percutanée. La valeur calculée à l'aide de l'équation (7) doit donc être divisée par deux dans ce cas.

En 1941, le Comité Consultatif des États-Unis pour la Protection contre les rayons X et le radium ⁽¹²⁾ a fixé à $10^{-8} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ la valeur de la $(\text{CMA})_{\text{air}}$ pour l'exposition professionnelle (40 heures/semaine) à ^{222}Rn plus ses produits de filiation. Cependant, la CIPR ⁽²⁾ donnait pour cette $(\text{CMA})_{\text{air}}$ une valeur de $10^{-7} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ en cas d'exposition continue (168 heures/semaine). Malgré la grande différence de ces chiffres et l'important dossier dont on dispose sur l'expérience acquise avec le radon, il n'existe que peu, sinon pas du tout, de cas bien établis de dommage grave résultant d'expositions à ces niveaux. Toutefois, les calculs indiquent qu'une concentration dans l'air de $10^{-7} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ pourrait entraîner une dose trop élevée aux bronches et le CNPR ⁽¹⁾ avait précédemment recommandé la valeur de $10^{-8} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ comme $(\text{CMA})_{\text{air}}$ pour ^{222}Rn plus ses produits de filiation (168 heures/semaine).

De récentes études ont montré que lorsque l'air ordinaire contient du radon et ses produits de filiation, les ions libres de RaA ne représentent qu'environ 10 p. 100 du nombre total d'atomes RaA qui seraient présents à l'équilibre ; et toute la dose délivrée aux bronches, à une petite fraction près, est due à ces atomes non fixés aux centres de condensation. Si l'on prend les débits de dose ainsi mesurés

* Dans la précédente publication de ce rapport ⁽²⁾, l'intensité d'exposition était prise égale à 0,3 rem/semaine de préférence à 0,1 rem/semaine, et le nuage radioactif était supposé être une sphère infinie plutôt qu'une demi-sphère infinie entourant le corps. De plus, les équations étaient données pour une exposition continue plutôt que pour la semaine de travail type. C'est pourquoi, les valeurs des CMA publiées précédemment ont été multipliées par trois facteurs, à savoir $1/3 \cdot 2 \cdot 4,4 = 2,9$. Nous pensons que les nouvelles hypothèses sont suffisamment prudentes dans tous les cas pratiques qui peuvent se présenter.

comme base de calcul, la $(CMA)_{air}$ pour une exposition au radon et à ses produits de filiation est égale à $3 \cdot 10^{-6} / (1 + 1000f)$ où f est le rapport du nombre des ions RaA qui ne sont pas fixés à des centres de condensation au nombre total d'ions RaA présents à l'équilibre.

Dans le cas de ^{220}Rn , la plus grande partie de la dose délivrée aux bronches est due aux ions libres de ThB dont la proportion n'atteint que 1/2000 du nombre d'ions ThB présents à l'équilibre dans l'air ordinaire non filtré. C'est pour cette raison, ainsi que pour des considérations relatives à l'énergie, que la $(CMA)_{air}$ est plus élevée et on recommande de prendre comme valeur $6 \cdot 10^{-6} / (1 + 40\,000f)$, si les ions libres de ThB constituent une fraction f du nombre d'atomes ThB présents à l'équilibre. Les valeurs données ici pour le radon et ses produits de filiation ainsi que pour le thoron et ses produits de filiation sont valables pour une semaine de travail de 40 heures.

7. *Concentration maximale admissible de radionuclides non identifiés (CMANI)*. L'identité des contaminants radioactifs dans l'air, l'eau ou les aliments doit être établie avant que l'on puisse appliquer des valeurs appropriées des CMA, soit pour l'exposition professionnelle, soit pour l'exposition d'une population à l'extérieur des zones contrôlées. Dans un grand nombre de cas, il ne se pose aucun problème concernant l'identité du radionuclide, parce que les opérations effectuées ne mettent en cause qu'un seul radionuclide. Quelquefois, cependant, des contrôles préliminaires révèlent la présence d'une contamination radioactive et l'on ignore dans une large mesure quels sont les radionuclides dont la contribution est la plus importante. Lorsqu'un laboratoire utilise un certain nombre de radionuclides, par exemple un mélange de produits de fission, un prélèvement d'air peut ne fournir que quelques indices sur l'identité du radionuclide en cause. En utilisant l'équipement et les techniques les plus simples, on peut déterminer en quelques minutes le niveau de contamination de l'air, mais des heures ou même des jours peuvent être nécessaires pour effectuer les analyses radiochimiques indispensables pour identifier le ou les radionuclides présents dans l'air. Heureusement, dans de tels cas, il n'est en général pas nécessaire de passer par une analyse radiochimique fastidieuse, longue et coûteuse. S'il est établi que certains des radionuclides les plus dangereux sont absents, autrement dit si la concentration des radionuclides les plus dangereux est faible comparée aux valeurs des CMA données dans le tableau 1, les opérations peuvent être poursuivies en toute sécurité sans que l'on se préoccupe de l'identité du radionuclide ou de la composition du mélange de radionuclides, à condition que la concentration ne dépasse pas les valeurs fixées pour les CMA de radionuclides non identifiés (CMANI), telles qu'elles sont indiquées dans le tableau 3 pour l'eau ou dans le tableau 4 pour l'air. Ces valeurs CMANI s'appliquent à l'exposition professionnelle continue (168 heures/semaine) ; elles doivent être divisées par dix lorsqu'elles sont utilisées provisoirement à l'extérieur de la zone d'exposition contrôlée et à proximité de celle-ci. Il faut noter que l'emploi de valeurs CMANI peut épargner des dépenses et des efforts immenses, lorsqu'on les applique comme il convient pour éviter des analyses inutiles de radionuclides dans des zones où la contamination de l'air, de l'eau et des aliments est habituellement inférieure aux valeurs correspondantes des CMANI. Par contre, elles peuvent entraîner des difficultés inutiles lors-

qu'elles sont utilisées mal à propos. Par exemple, si les mesures initiales indiquent une quantité négligeable de ^{226}Ra et de ^{228}Ra dans l'eau de boisson d'une petite communauté à proximité d'un laboratoire atomique et s'il est établi, en mesurant sur des prélèvements quotidiens les activités totales α , β et γ , que la CMANI ($1/10 \cdot 1 \cdot 10^{-6} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3 = 1 \cdot 10^{-7} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$) n'est pas dépassée, il paraîtrait déraisonnable d'effectuer une analyse radiochimique quotidienne de cette eau. Si, par contre, le niveau de contamination était compris entre 10^{-5} et $2 \cdot 10^{-5} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$, il serait inopportun de fermer l'installation ou d'entreprendre une modification coûteuse des techniques sans avoir auparavant identifié les radionuclides en cause, car il se pourrait que la contamination de l'eau soit due à ^{24}Na et ^{32}P . Dans ce cas, les valeurs des CMA qu'il conviendrait d'appliquer à proximité de l'établissement seraient respectivement : $1/10 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 10^{-4}$ et $1/10 \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 2 \cdot 10^{-5}$ (voir tableau 1).

8. *Concentration maximale admissible de mélanges connus de radionuclides.* Supposons qu'une personne soit exposée à des concentrations ϱ_{aA} , ϱ_{aB} , ... ϱ_{eA} , ϱ_{eB} , ... $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ des isotopes A, B, ... respectivement dans l'air et dans l'eau, ainsi qu'à des sources externes de rayonnement γ et de neutrons. Admettons, en outre, que les sources externes délivrent respectivement des doses R_γ^x , R_n^x de rayonnement γ et de neutrons à un organe x donné. Si L^x remplace la dose hebdomadaire moyenne admise pour l'organe x par les normes fondamentales, la dose totale reçue par cet organe x est donnée par :

$$\left[\frac{\varrho_{aA}}{(\text{CMA})_{aA}^x} + \frac{\varrho_{aB}}{(\text{CMA})_{aB}^x} + \dots + \frac{\varrho_{eA}}{(\text{CMA})_{eA}^x} + \frac{\varrho_{eB}}{(\text{CMA})_{eB}^x} + \dots \right] L^x + R_\gamma^x + R_n^x \quad (22)$$

L^x ne sera pas dépassée, si

$$\frac{\varrho_{aA}}{(\text{CMA})_{aA}^x} + \frac{\varrho_{aB}}{(\text{CMA})_{aB}^x} + \dots + \frac{\varrho_{eA}}{(\text{CMA})_{eA}^x} + \frac{\varrho_{eB}}{(\text{CMA})_{eB}^x} + \dots + \frac{R_\gamma^x}{L^x} + \frac{R_n^x}{L^x} \leq 1 \quad (23)$$

et l'on dispose ainsi d'un critère permettant d'établir si l'exposition considérée dépasse ou non celle admise par les normes fondamentales. Si l'organe x ne figure pas dans le tableau 1 comme organe de référence et s'il n'est pas possible de faire une estimation indépendante des valeurs correspondantes des CMA, on peut utiliser la CMA établie pour l'organisme entier en appliquant le facteur de correction $L^x/0,1$, autrement dit, on peut, dans de tels cas, substituer L^x ($\text{CMA})_{aA}^{0.E.}/0,1$ à $(\text{CMA})_{aA}^x$. En général, il faudra calculer la dose délivrée à tous les organes pour lesquels il y a lieu de penser que la dose dépasse les limites prescrites. Souvent l'organisme entier en fera partie, même si aucun des radionuclides n'irradie une partie importante du corps. Si l'on suppose qu'une partie importante de l'organisme est irradiée à des intensités à peu près comparables, le calcul est essentiellement le même que précédemment si ce n'est qu'il faut utiliser les valeurs des CMA établies pour l'organisme entier. Le critère s'écrit donc :

$$\frac{\varrho_{aA}}{(\text{CMA})_{aA}^{0.E.}} + \frac{\varrho_{aB}}{(\text{CMA})_{aB}^{0.E.}} + \dots + \frac{\varrho_{eA}}{(\text{CMA})_{eA}^{0.E.}} + \frac{\varrho_{eB}}{(\text{CMA})_{eB}^{0.E.}} + \dots + \frac{R_\gamma^{0.E.}}{0,1} + \frac{R_n^{0.E.}}{0,1} \leq 1 \quad (24)$$

En fait, cette condition limite le débit de dose moyen délivré à l'organisme à 0,1 rem/semaine. Il peut y avoir certains organes dans lesquels le débit de dose dépasse 0,1 rem/semaine, ce qui est considéré comme admissible dans la mesure où ces organes ne constituent pas une partie importante du corps. Il faut, naturellement, tenir compte également des critères valables pour ces organes, et l'application de l'équation (23) empêchera tout organe pris isolément de recevoir une dose supérieure à la limite admissible fixée pour cet organe. Toutefois, il semblerait trop prudent et contraire à l'esprit des normes fondamentales de limiter la dose délivrée à toute partie de l'organisme à une intensité maximale de 0,1 rem/semaine pour la seule raison que l'organisme entier reçoit quelque dose qui peut d'ailleurs être très faible dans la plus grande partie de l'organisme et n'atteindre l'intensité de 0,1 rem/semaine que dans une faible portion. Les valeurs des (CMA)^{O.E.} telles qu'elles ont été données dans le tableau 1 et introduites dans l'équation (24), ont été calculées en admettant que la dose d'irradiation totale à considérer dans ce cas est la dose exprimée en gramme-rem ou l'énergie pondérée totale délivrée à l'organisme entier. C'est sur cette base que la quantité de radionuclide présente dans l'organisme entier a été obtenue par l'équation (3), en posant m égal à la masse de l'organisme entier ($m = 70\,000$ g), $f_2 = 1$, ϵ égal à l'énergie absorbée pondérée, $n = 1$ et $R = 0,1$ rem/semaine.

L'utilisation pratique de ces critères peut être illustrée par l'exemple suivant : Supposons que l'on se trouve en présence d'un mélange constitué par ⁹⁰Sr, ²³⁹Pu et ²⁴Na, ainsi que d'une source γ externe, et que les intensités de dose mesurées sont celles figurant dans le tableau A. (Voir tableau A page suivante).

Les concentrations indiquées ont été choisies de manière telle qu'elles illustrent le cas d'un mélange qui est inférieur à la limite admissible en ce qui concerne l'un des critères (os), mais qui dépasse légèrement la limite déterminée par l'un des autres critères (organisme entier).

L'application du critère (23) à l'os donne :

$$\begin{aligned} & \frac{\varrho_{aA}}{(CMA)_{aA}^x} + \frac{\varrho_{eA}}{(CMA)_{eA}^x} + \frac{\varrho_{aB}}{(CMA)_{aB}^x} + \frac{\varrho_{eB}}{(CMA)_{eB}^x} + \\ & \quad \frac{0,1}{0,56} \left[\frac{\varrho_{aC}}{(CMA)_{aC}^{O.E.}} + \frac{\varrho_{eC}}{(CMA)_{eC}^{O.E.}} \right] + \frac{R_\gamma^x}{L^x} \\ & = 0,06 + 0,038 + 0,2 + 0,13 + \frac{0,1}{0,56} (0,1 + 0,2) + \frac{0,065}{0,56} = 0,60 < 1 \end{aligned}$$

Le débit de dose moyen délivré à l'os est donc d'environ $0,60 \cdot 0,56 = 0,34$ rem/semaine effectif ; il est, par conséquent, dans les limites fixées pour l'os.

L'application du critère (24) correspondant à l'organisme entier donne :

$$\begin{aligned} & \frac{\varrho_{aA}}{(CMA)_{aA}^{O.E.}} + \frac{\varrho_{eA}}{(CMA)_{eA}^{O.E.}} + \frac{\varrho_{aB}}{(CMA)_{aB}^{O.E.}} + \frac{\varrho_{eB}}{(CMA)_{eB}^{O.E.}} + \\ & \quad \frac{\varrho_{aC}}{(CMA)_{aC}^{O.E.}} + \frac{\varrho_{eC}}{(CMA)_{eC}^{O.E.}} + \frac{R_\gamma^{O.E.}}{L^{O.E.}} = \\ & 0,02 + 0,015 + 0,04 + 0,013 + 0,1 + 0,2 + 0,65 = 1,038 \end{aligned}$$

Le calcul montre donc que le mélange dépasse légèrement, mais de manière négligeable, la limite admissible pour l'organisme entier.

Tableau A. Calcul de la CMA d'un mélange de radionuclides

Exemple d'exposition simultanée à plusieurs radionuclides (sous forme soluble) présents dans l'air et dans l'eau, ainsi qu'à une source extérieure de rayonnement.

Origine de l'exposition	Organe exposé	Dans l'air*	Dans l'eau*
^{90}Sr	Os	$\frac{\varrho_{aA}}{(CMA)_{aA}^x} = \frac{1,8 \times 10^{-11} \mu\text{Ci/cm}^3}{3 \times 10^{-10} \mu\text{Ci/cm}^3}$	$\frac{\varrho_{eA}}{(CMA)_{eA}^x} = \frac{1,5 \times 10^{-7} \mu\text{Ci/cm}^3}{4 \times 10^{-6} \mu\text{Ci/cm}^3}$
	Organisme entier	$\frac{\varrho_{aA}}{(CMA)_{aA}^{O.E.}} = \frac{1,8 \times 10^{-11} \mu\text{Ci/cm}^3}{9 \times 10^{-10} \mu\text{Ci/cm}^3}$	$\frac{\varrho_{eA}}{(CMA)_{eA}^{O.E.}} = \frac{1,5 \times 10^{-7} \mu\text{Ci/cm}^3}{1 \times 10^{-5} \mu\text{Ci/cm}^3}$
^{239}Pu	Os	$\frac{\varrho_{aB}}{(CMA)_{aB}^x} = \frac{4 \times 10^{-13} \mu\text{Ci/cm}^3}{2 \times 10^{-12} \mu\text{Ci/cm}^3}$	$\frac{\varrho_{eB}}{(CMA)_{eB}^x} = \frac{1,3 \times 10^{-5} \mu\text{Ci/cm}^3}{1 \times 10^{-4} \mu\text{Ci/cm}^3}$
	Organisme entier	$\frac{\varrho_{aB}}{(CMA)_{aB}^{O.E.}} = \frac{4 \times 10^{-13} \mu\text{Ci/cm}^3}{1 \times 10^{-11} \mu\text{Ci/cm}^3}$	$\frac{\varrho_{eB}}{(CMA)_{eB}^{O.E.}} = \frac{1,3 \times 10^{-5} \mu\text{Ci/cm}^3}{1 \times 10^{-3} \mu\text{Ci/cm}^3}$
^{24}Na	Organisme entier	$\frac{\varrho_{aC}}{(CMA)_{aC}^{O.E.}} = \frac{2 \times 10^{-7} \mu\text{Ci/cm}^3}{2 \times 10^{-6} \mu\text{Ci/cm}^3}$	$\frac{\varrho_{eC}}{(CMA)_{eC}^{O.E.}} = \frac{2 \times 10^{-3} \mu\text{Ci/cm}^3}{1 \times 10^{-2} \mu\text{Ci/cm}^3}$
γ^{**}	Os	$\frac{R_\gamma^x}{L^x} = \frac{0,065 \text{ rem/semaine}}{0,56 \text{ rem/semaine}}$	
	Organisme entier	$\frac{R_\gamma^{O.E.}}{L^{O.E.}} = \frac{0,065 \text{ rem/semaine}}{0,1 \text{ rem/semaine}}$	

* Les rapports donnés pour ^{90}Sr , ^{239}Pu et ^{24}Na correspondent à $(\mu\text{Ci/cm}^3 \text{ présents dans l'air}) / (CMA)_{aA}^x$ où $(CMA)_{aA}^x$ est la $(CMA)_{\text{air}}$ pour l'élément A (^{90}Sr) et l'organe x (os), etc...

** Le rapport donné pour γ correspond à (débit de dose EBR réel) / (débit de dose EBR maximal admissible).

Si l'on élimine la source de rayonnement γ , le débit de dose au niveau de l'os est égal à $0,48 \cdot 0,56 = 0,27 \text{ rem/semaine}$ alors qu'au niveau de l'organisme entier il est de $0,39 \cdot 0,1 = 0,039 \text{ rem/semaine}$. Ces débits de dose représentent 48 p. 100 et 39 p. 100 des limites correspondantes ; l'os constitue donc maintenant l'organe critique. Dans ces conditions, l'une quelconque des concentrations, ou même toutes, pourraient être multipliées par un facteur allant jusqu'à 2 sans que les limites admissibles soient dépassées.

9. *Modifications nécessaires pour d'autres applications.* Les valeurs données pour les CMA dans le tableau 1 concernent essentiellement l'exposition professionnelle et les types d'exposition mentionnés. Elles sont, néanmoins, souvent employées

dans d'autres circonstances très diverses. Dans la plupart des cas, les conditions d'exposition ne seront pas rigoureusement conformes aux conditions posées pour le calcul de ces valeurs. Il faut donc s'assurer avec beaucoup d'attention et de discernement que l'écart par rapport aux conditions d'exposition professionnelle posées dans ce rapport n'est pas tel qu'il invalide complètement l'emploi de ces valeurs ; certaines des divergences les plus courantes qui peuvent souvent entraîner de grandes inexactitudes sont mentionnées ci-dessous.

Dans ce rapport, les calculs ont été fondés sur une période d'exposition de 50 ans et un niveau d'exposition constant. Aussi, une situation transitoire, comme, par exemple, celle due aux retombées peu de temps après une explosion nucléaire ou un grave accident de réacteur, cas dans lesquels le niveau d'activité décroît rapidement et dans lesquels même l'abondance relative des différents radionuclides peut varier, entraîne-t-elle un risque très différent de celui dû à l'exposition professionnelle pendant 50 ans à niveau constant qui a été prise comme base. Le désaccord est ici si important qu'essayer de faire les corrections nécessaires revient à faire un nouveau calcul.

Les $(CMA)_{\text{eau}}$ indiquées dans ce rapport peuvent être appliquées aux aliments, mais utiliser la $(CMA)_{\text{eau}}$ pour 168 heures/semaine sans correction revient à supposer que 2200 g de la nourriture d'un individu, c'est-à-dire en fait tous les aliments qu'il ingère, sont contaminés à ce niveau et que cet état de choses persistera pendant 50 ans ou jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint dans l'organisme. Il est évidemment nécessaire d'appliquer un facteur de correction pour tenir compte de ce qui est ingéré, mais prendre naïvement comme facteur de correction le rapport de 2200 g à la quantité en grammes ingérée par jour d'un aliment particulier, le beurre par exemple, revient à admettre qu'il n'y a pas d'autre aliment ni de boisson contaminés. Là encore, il faut considérer l'ensemble de la situation et faire ces corrections avec discernement.

Les valeurs données pour les CMA sont souvent utilisées pour évaluer la dose résultant d'une absorption unique importante de radionuclide. Ce procédé se justifie dans de nombreux cas, mais il peut en exister un grand nombre d'autres dans lesquels la répartition dans l'organisme, à la suite d'une exposition aiguë au nuclide, est nettement différente du schéma de répartition obtenu à la suite d'une exposition chronique à faible dose. Ainsi, de nombreux nuclides se concentrent dans l'os avec une longue période biologique ce qui, après de nombreuses années d'exposition, entraîne la présence d'une quantité importante de nuclide dans l'os. L'os est alors l'organe critique, même si la fraction de l'ingestion quotidienne qui parvient à l'os est bien plus faible que celle passant à travers le tractus GI. Par contre, dans le cas d'une dose unique élevée, le tractus GI peut être l'organe critique.

De nombreux autres facteurs peuvent jouer un rôle important dans la détermination de la valeur appropriée d'une limite maximale admissible. La richesse ou la carence relatives du régime alimentaire en d'autres nuclides ayant des propriétés chimiques similaires, l'étendue des différences physiologiques, ainsi que les différences de mœurs, d'âge et de sexe et la forme chimique du radionuclide ou la taille de la particule sur laquelle il est fixé, peuvent expliquer les fortes variations que subissent les valeurs des CMA dans certains cas. Actuelle-

ment, un grand nombre de ces facteurs et d'autres encore sont attentivement étudiés et leur influence sur les niveaux admissibles sera bientôt mieux connue. Dans l'état actuel de nos connaissances, la modification ou l'adaptation des valeurs indiquées dans ce rapport, en vue de leur application dans des circonstances autres que celles définies par les divers types d'exposition envisagés pour établir les normes fondamentales, exigent une étude attentive et l'avis compétent d'experts qualifiés dans ce domaine.

V. FACTEURS NÉCESSAIRES À LA RÉOLUTION DES ÉQUATIONS DES CMA

1. *Energie effective.* Le terme d'énergie effective utilisé dans les formules qui permettent de calculer les valeurs indiquées dans le tableau 1, prend des formes différentes selon les nécessités du problème considéré, c'est-à-dire : $\Sigma E(\text{EBR})$, $\Sigma E(\text{EBR})n$, $\Sigma EF(\text{EBR})n$, et parfois simplement ΣE . Dans ces expressions E est l'énergie totale absorbée dans l'organe pour une désintégration du noyau. Dans de tels cas, toute l'énergie absorbée dans le tissu lors du processus de décroissance radioactive (c'est-à-dire $X, \gamma, \alpha, \beta^-, \beta^+, e^-$ et reculs atomiques) a été comprise dans le terme d'énergie effective, à l'exclusion de l'énergie des neutrinos qui est supposée s'échapper du corps. Pour le rayonnement β , on a supposé que toute l'énergie de chaque particule β était dissipée dans l'organe critique. Sauf pour des organes très petits, cette hypothèse est justifiée puisque c'est, en général, la dose maximale qui importe. Diverses méthodes ont été développées pour déterminer la distribution énergétique β et pour trouver l'énergie effective, mais toutes sont laborieuses et longues; on a trouvé ⁽²⁷⁾ une équation empirique relativement simple donnant des résultats dont la précision est, dans la plupart des cas, d'environ 5 p. 100.

Pour le rayonnement β^- , cette équation est :

$$E = 0,33 E_m f \left(1 - \frac{Z^{1/2}}{50} \right) \left(1 + \frac{E_m^{1/2}}{4} \right) \quad (25)$$

dans laquelle on a :

- Z = numéro atomique du radionuclide émettant le rayonnement β
- f = proportion de désintégrations du type considéré
- E = énergie maximale (MeV) du type considéré.

Pour le rayonnement β^+ , l'équation est :

$$E = 0,33 E_m f \left(1 + \frac{E_m^{1/2}}{4} \right) + 2 f (0,51) (1 - e^{-\sigma x}) \quad (26)$$

où

- x = rayon effectif (cm) de l'organe contenant le radionuclide (les valeurs de x sont données dans le tableau 8).
- σ = coefficient total d'absorption diminué du coefficient de diffusion Compton, en cm^{-1} , pour l'énergie photonique donnée.

Le terme $2 (0,51)$ traduit l'énergie des deux gamma de 0,51 MeV résultant du processus d'annihilation.

Pour les autres types de rayonnement, les équations suivantes ont été utilisées :

Pour le rayonnement γ : $E = E_m f (1 - e^{-\sigma x})$ (27)

Pour le rayonnement α : $E = E_m f$ (28)

où E_m est l'énergie du photon ou de la particule α .

Pour la conversion interne, e^- :

$$E = f \left[(E_\gamma - \eta) \left(\frac{a_K}{1 + a_K} \right) + (\eta) \left(\frac{a_K}{1 + a_K} \right) (1 - e^{-\sigma x}) + E_\gamma \left(\frac{1 - e^{-\sigma x}}{1 + a_K} \right) \right] \quad (29)$$

où

a_K = coefficient de conversion interne pour la couche K , etc...

η = énergie de liaison pour l'élément de filiation

E_γ = énergie γ (MeV) du type considéré.

Pour le rayonnement X de capture K et L , on fait la simplification

$$E = f \eta (1 - e^{-\sigma x}) \quad (30)$$

Pour les reculs atomiques qui suivent une émission α :

$$E = f \frac{(\text{énergie de la particule } \alpha) (\text{masse de la particule } \alpha)}{(\text{masse du noyau fils de recul})} \quad (31)$$

EBR = efficacité biologique relative du rayonnement ; le facteur EBR est pris égal à l'unité pour les rayonnements β^- , β^+ , γ , X et les électrons de conversion (ou à 1,7 si l'énergie maximale $E_m \leq 0,03$ MeV pour β^- , β^+ ou e^-), 10 pour les particules α et 20 pour les atomes de recul.

n = facteur de dommage relatif pour les radionuclides fixés dans l'os. Le facteur de dommage relatif, n , est défini dans les normes fondamentales (paragraphe b) et une étude détaillée de son application, appuyée par des exemples, est donnée au paragraphe IV. 2.

F_i = le rapport, au temps t , du nombre de désintégrations par unité de temps des atomes de filiation au nombre de désintégrations par unité de temps des atomes parents dans l'organe critique. Ce facteur peut être multiplié par l'énergie du i^e produit de filiation de telle sorte qu'elle puisse être ajoutée à l'énergie des autres produits de filiation et à celle de l'élément parent, en vue d'obtenir l'énergie pondérée d'une chaîne radioactive qui est équivalente à celle délivrée à l'organe critique par un radionuclide unique. Pour le i^e produit de filiation,

$$F_i = \frac{\prod_{j=1}^i \frac{T_j}{T_j}}{1 - e^{-\lambda_0 t}} \sum_{n=0}^i \frac{T'_n (1 - e^{-\lambda n t})}{\prod_{\substack{p=0 \\ p \neq n}}^i (T_n - T_p)} \quad (32)$$

formule dans laquelle :

- λ_0 = coefficient total de décroissance de l'élément parent ($= 0,693/T_0$) ;
 l'indice zéro se rapporte à l'isotope parent
 λ_i = coefficient total de décroissance du i^e produit de filiation
 T_i = période totale du i^e produit de filiation
 T_i^r = période radioactive du i^e produit de filiation
 t = temps d'exposition professionnelle (50 ans)

Afin d'expliciter le sens de la notation employée dans les équations précédentes, l'équation (32) est développée ci-dessous. Pour l'élément parent $F_0 = 1$, pour le premier produit de filiation

$$F_1 = \frac{T_1/T_1^r}{1 - e^{-\lambda_0 t}} \left[(1 - e^{-\lambda_0 t}) \frac{T_0}{T_0 - T_1} + (1 - e^{-\lambda_1 t}) \frac{T_1}{T_1 - T_0} \right] \quad (33)$$

et pour le deuxième produit de filiation,

$$F_2 = \frac{T_1 T_2 / T_1^r T_2^r}{1 - e^{-\lambda_0 t}} \left[\frac{(1 - e^{-\lambda_0 t}) T_0^2}{(T_0 - T_1)(T_0 - T_2)} + \frac{(1 - e^{-\lambda_1 t}) T_1^2}{(T_1 - T_0)(T_1 - T_2)} + \frac{(1 - e^{-\lambda_2 t}) T_2^2}{(T_2 - T_0)(T_2 - T_1)} \right] \quad (34)$$

etc... pour tous les produits de filiation de la chaîne. L'intervention de ces facteurs dans les équations donnant les CMA est discutée au paragraphe IV.4. Dans le cas des isotopes du radium, descendants d'un isotope du thorium, un récent travail expérimental a montré que le radium de filiation se comporte comme s'il passait dans le sang. Dans de tels cas, le facteur f_2 du radium a été introduit dans la formule donnant F_1 , F_2 , etc...

L'énergie effective peut être obtenue en sommant simplement les composantes de $\Sigma EF(\text{EBR})n$

$$\Sigma EF(\text{EBR})n = \Sigma_i F_i [(\text{EBR})_{if}^i E_j^i + (\text{EBR})_{kf}^i E_k^i n_k^i + (\text{EBR})_{sf}^i E_s^i n_s^i + (\text{EBR})_{mf}^i E_m^i n_m^i + (\text{EBR})_{vf}^i E_v^i n_v^i + (\text{EBR})_{pf}^i E_p^i + (\text{EBR})_{rf}^i E_r^i n_r^i] \quad (35)$$

où les indices j , k , s , m , v , p et r se rapportent respectivement aux γ , négatons, positons, α , conversions internes, captures d'électrons et reculs α . Le facteur EBR de ces rayonnements est précisé plus haut.

Les énergies effectives ⁽²⁸⁾ utilisées pour calculer les expositions admissibles indiquées dans le tableau 1 sont données dans les tableaux 5 et 5a. Dans le tableau 5a, tous les noyaux dérivés sont mentionnés individuellement à la suite du noyau parent. Cette liste détaillée est en effet nécessaire, car les formules pour le tractus GI nécessitent l'emploi des énergies individuelles pour chaque noyau de filiation. Il faut également, pour toute la chaîne, indiquer séparément les facteurs F_i , de manière à pouvoir calculer facilement, à l'aide de toutes les données telles qu'elles sont présentées, les valeurs des CMA et des quantités admissibles dans l'organisme pour un mélange quelconque d'éléments parents et produits de filiation.

2. *Données relatives à l'homme standard.* Pour pouvoir calculer toutes les CMA sur une base biologique commune, on a défini ce que l'on appelle « l'homme stan-

dard» ou « l'homme moyen »^(29, 30). Les premières valeurs établies par le Comité ont été présentées lors de la Conférence de Chalk River⁽⁹⁾, mais elles ont été modifiées ultérieurement lors du sixième Congrès International de Radiologie⁽³¹⁾, lors de la Conférence de Harriman sur la dose admissible⁽³²⁾ et lors du septième Congrès International de Radiologie⁽³³⁾. Les chiffres donnés pour le tractus GI⁽³⁴⁾ (tableau 11) et la composition chimique des différents organes (tableau 7) sont de nouveaux additifs concernant l'homme standard. Dans le tableau 12, quelques références bibliographiques sont mentionnées, mais il convient de souligner qu'il ne s'agit là que de quelques unes de celles qui ont été consultées. Pour une étude plus détaillée, le lecteur est prié de consulter les références citées dans la « Bibliographie sur les données biologiques », * ainsi que celles mentionnées ci-dessous⁽³⁵⁻³⁹⁾.

3. *Autres facteurs biologiques et physiques associés.* D'autres termes biologiques et physiques associés, présentant de l'intérêt et utilisés pour l'établissement du tableau 1, figurent dans le tableau 12. Pour chaque élément et chaque radioisotope, les multiples fractions de distribution, la concentration dans les organes critiques, les périodes biologiques, etc... ont été recherchées dans une masse importante de données expérimentales : données qui, bien que très nombreuses, ne fournissaient dans un grand nombre de cas que peu de renseignements sur les quantités spécifiques recherchées. Pour fixer des valeurs satisfaisantes pour les CMA en cas d'exposition professionnelle, l'idéal serait de disposer, pour chacun des radionuclides, de données concernant des êtres humains exposés pendant toute leur vie. Or, non seulement ces données n'existent pratiquement pas en ce qui concerne l'homme (voir l'étude détaillée faite au chapitre III), mais elles sont même extrêmement rares en ce qui concerne les animaux. Comme il a été expliqué précédemment, un grand nombre des facteurs biologiques utilisés pour le calcul des expositions continues figurant au tableau 1 n'ont pas été tirés directement d'expériences d'exposition continue pratiquées sur l'animal, mais n'ont pu qu'être déduites de données relatives à des expositions uniques. Des recherches expérimentales⁽⁴⁰⁾ ont montré que l'extrapolation de données obtenues par des études sur des doses uniques au cas de l'exposition continue est assez satisfaisante, si la représentation graphique sur papier semi-logarithmique de la rétention dans l'organe critique en fonction du temps, après exposition unique, donne une courbe présentant une longue portion droite. En général, le radionuclide ne semble pas être fixé de manière uniforme dans un organe et la courbe de rétention peut être représentée par une somme d'exponentielles. La composante correspondant à la période la plus longue est généralement la plus significative dans le cas d'exposition de longue durée ; elle est obtenue en extrapolant jusqu'au temps $t = 0$ la portion droite, mentionnée ci-dessus, de la courbe. Il arrive parfois qu'on ne dispose d'aucune donnée pour un élément — même les données relatives à l'exposition unique d'animaux faisant défaut. Dans une telle situation, on peut quelquefois obtenir une partie des renseignements nécessaires en admettant qu'il existe un état d'équilibre entre les isotopes stables de l'élément qui se trouvent dans l'organe critique et ceux contenus dans les aliments, dans

* Bibliography for Biological Data, Health Physics, 1959, 2, n° 3.

l'eau et dans l'air qui pénètrent dans l'organisme à partir du milieu ambiant ⁽¹⁰⁾, c'est-à-dire en posant que la quantité ingérée et fixée dans l'organe critique par jour est égale à la quantité qui en est éliminée par jour. Dans d'autres cas où les données expérimentales font défaut, on fait parfois des comparaisons directes avec des éléments ayant des propriétés chimiques semblables. Pour vérifier les valeurs données dans les tableaux et pour faire des recoupements, on a utilisé un grand nombre d'équations et d'approximations — dont certaines sont énumérées dans ce paragraphe.

- (a) I = ingestion quotidienne moyenne d'un élément (g/jour).
- (b) f_1 = fraction du radionuclide passant du tractus GI dans le sang.
- (c) C = concentration moyenne de l'élément dans l'organe critique (grammes d'élément par gramme de tissu mou).
- (d) f_2 = fraction de radionuclide passant du sang dans l'organe critique ; dans quelques cas, la valeur choisie ne représente que la composante de période biologique la plus longue comme indiqué plus haut.
- (e) f_2 = rapport de la quantité de radionuclide dans l'organe critique à celle présente dans l'organisme entier. Ce rapport est nécessaire pour le calcul de la quantité maximale admissible dans l'organisme, q . Le rapport f_2 est très difficile à déterminer à partir d'un nombre limité de données expérimentales, aussi est-il heureux que f_2 ne soit pas nécessaire pour le calcul des valeurs des CMA. Diverses méthodes faisant appel à des rapports plus faciles à mesurer sont souvent utilisées pour déterminer f_2 ; elles sont énumérées ci-dessous :
 - (i) Dans des conditions d'exposition continue, lorsque l'équilibre a été atteint

$$f_2^x = \frac{q^x}{q^x + q^y + q^z + \dots} = \frac{q^x}{q} \quad (36)$$

expression dans laquelle les exposants x, y, z , etc... se rapportent à différents organes, par exemple $q^x = \mu\text{Ci}$ dans l'organe x , $q^y = \mu\text{Ci}$ dans l'organe y , etc... et $q^y = \mu\text{Ci}$ dans l'organisme entier.

- (ii) Dans le cas où f_e et T peuvent être déduits de données relatives à une exposition unique, f_2 peut être déterminé par

$$f_2^x = \frac{T^x f_e^x}{T^x f_e^x + T^y f_e^y + T^z f_e^z + \dots} \quad (37)$$

Parfois, lorsqu'un temps long s'est écoulé après l'administration du radionuclide en dose unique, les périodes biologiques correspondant aux différents organes deviennent sensiblement égales. Dans ce cas :

$$f_2^x = \frac{f_e^x}{f_e^x + f_e^y + f_e^z + \dots} \quad (38)$$

- (iii) Dans le cas de données obtenues par administration intraveineuse unique, on peut utiliser l'équation (38) en posant :

$$f_e^x = f_1 f_2^x \quad f_e^y = f_1 f_2^y, \text{ etc...}$$

On obtient alors :

$$f_2^x = \frac{f_2^{x'}}{f_2^x + f_2^y + f_2^z + \dots} \quad (39)$$

Les équations (38) et (39) s'appliquent également dans tous les cas où $T_r \ll T_b$ pour les organes x, y, z , etc...

(iv) Pour des données obtenues par exposition unique :

$$\begin{aligned} f_2^x &= \frac{T^x f_e^x}{T^t (f_1 - f_e^u)} = \frac{T^x f_e^x}{T^t (f_e^x + f_e^y + f_e^z + \dots)} \\ &= \frac{T^x f_2^x}{T^t (f_2^x + f_2^y + f_2^z + \dots)} \end{aligned} \quad (40)$$

formule dans laquelle l'exposant t désigne l'organisme entier et f_e^u = fraction de la quantité ingérée qui passe rapidement dans les urines. Lorsqu'on ne dispose pas des données relatives à f_e^u , on peut utiliser les approximations suivantes :

$$f_2^x \geq \frac{T^x f_e^x}{T^t f_1} \quad (41)$$

$$f_2^x \geq \frac{T^x f_a^x}{T^t f_a^t} \quad (42)$$

(v) Dans le cas d'isotopes stables ou de radionuclides pour lesquels $T_r \gg T_b$:

$$f_2^x = \frac{m^x C^x}{m^t C^t}$$

Les équations (37), (41) et (42) peuvent être modifiées dans ce cas, de sorte que :

$$f_2^x = \frac{T_b^x f_e^x}{T_b^x f_e^x + T_b^y f_e^y + T_b^z f_e^z + \dots} \quad (43)$$

et

$$f_2^x = \frac{T_b^x f_e^x}{T_b^t f_1} \quad (44)$$

$$f_2^x = \frac{T_b^x f_a^x}{T_b^t f_a^t} \quad (45)$$

(f) f_a = fraction de la quantité inhalée qui arrive dans l'organe critique.
Pour une substance soluble,

$$f_a = (0,25 + 0,5 f_1) f_2 \quad (46)$$

Lorsqu'on ne connaît pas la fraction f_2' , on la remplace par f_2 . Il est parfois commode d'écrire f_a sous la forme

$$f_a = \left(0,5 + \frac{0,25}{f_1}\right) f_e$$

Les valeurs des CMA sont indiquées dans le tableau 1 pour une inhalation de substances insolubles ou peu solubles ; dans ce cas, c'est en général une partie du tractus GI ou les poumons qui constituent l'organe critique. A moins qu'on ne dispose de données sur l'inhalation des particules considérées de poussières insolubles, radioactives, on admet que, dans le cas des poumons, $f_a = 0,12$. Une partie des substances radioactives inhalées est déglutie, de sorte qu'elle irradie le tractus GI. Dans le cas où une partie du tractus GI constitue l'organe critique, la valeur de f_a est donnée par la relation, $f_a = 0,62$ pour une substance insoluble et $f_a = 0,5$ pour une substance soluble.

- (g) f_e = fraction de la quantité ingérée qui est retenue dans l'organe critique. Pour l'ingestion de composés solubles,

$$f_e = f_1 f_2' \quad (47)$$

On emploie parfois f_2 à la place de f_2' lorsqu'on ne dispose pas de données meilleures. Pour l'ingestion de composés insolubles, c'est une partie du tractus GI qui constitue le tissu critique.

- (h) T_b = période biologique ou temps nécessaire pour que la moitié de l'élément ou du radionuclide soit éliminée par des processus biologiques. Lorsque T_b ne peut être obtenu à partir de données expérimentales pour un radionuclide particulier, on admet que le temps d'élimination biologique du radionuclide considéré est le même que celui de l'élément stable. En admettant l'existence d'un état d'équilibre entre l'élément stable dans les aliments et l'eau et l'élément stable dans l'organe critique, on peut poser que la quantité en grammes éliminée en un jour est égale à la quantité en grammes fixée par jour. Il s'ensuit que, pour un élément stable :

$$T_b = \frac{0,693 \text{ } m \text{ } C}{I f_e} \quad (48)$$

Dans l'équation ci-dessus, f_e peut être remplacé par f_a si le dépôt de l'élément stable dans l'organisme est dû à une inhalation plutôt qu'à une ingestion. Pour une substance insoluble, dans les poumons, T_b est pris égal à 120 jours pour tous les radionuclides, à l'exception du plutonium et du thorium pour lesquels on prend respectivement $T_b = 1$ an et $T_b = 4$ ans.

- (i) T_r = période radioactive.
 (j) T = période effective. Puisque, par définition, le coefficient total de décroissance est égal à la somme des coefficients de décroissance

biologique et de décroissance physique, c'est-à-dire $\lambda = \lambda_b + \lambda_r$

$$T = \frac{T_b T_r}{T_b + T_r} \quad (49)$$

Pour un radionuclide, l'équation (48) devient :

$$T = \frac{0,693 \ m \ C}{I f_e} \quad (50)$$

dans laquelle C = grammes de radionuclide par gramme d'organe. Si $T_r \gg T_b$, C établi pour l'élément stable est approximativement égal à C correspondant au radionuclide.

Comme il a été indiqué précédemment, des données relatives à une exposition unique peuvent être utilisées de façon satisfaisante pour déterminer les constantes biologiques relatives à une exposition chronique, si la courbe représentant, en coordonnées semi-logarithmiques, la rétention en fonction du temps d'exposition comporte une longue portion droite faisant suite à l'élimination rapide initiale. Si l'on n'effectue pas de correction relative à la décroissance radioactive, la période effective est, dans de tels cas, liée à l'ordonnée b de la courbe prise au début de la partie droite et à l'ordonnée c d'un point correspondant à un temps ultérieur quelconque, par la relation :

$$T = \frac{0,693 \ t}{\text{Log } \frac{b}{c}} \quad (51)$$

dans laquelle t = intervalle de temps compris entre b et c .

Dans deux organes quelconques x et y :

$$\frac{f_2^x}{f_2^y} = \frac{m^x C^x}{m^y C^y} \quad (52)$$

et

$$\frac{T^x}{T^y} = \frac{f_2^x f_e^x}{f_2^y f_e^y} \quad (53)$$

Comme il a été indiqué précédemment, l'organe critique est l'organe dont l'atteinte par un radionuclide entraîne le plus grand dommage pour l'organisme. Cependant, dans la plupart des cas, c'est l'organe qui accumule le radionuclide à la concentration la plus élevée. Après avoir déterminé l'organe critique, il convient de vérifier si la concentration dans cet organe est supérieure ou non à la concentration moyenne. Si la concentration dans l'organe x est supérieure à la concentration moyenne dans le reste de l'organisme, on a :

$$\frac{m (1 - f_2^x)}{(70\ 000 - m) f^x} \leq 1 \quad (54)$$

APPENDICE

Concentrations dans l'air et dans l'eau calculées à l'aide d'une fonction puissance. Bien que les formules utilisées pour le calcul des CMA soient fondées sur l'hypothèse que l'élimination biologique suit une loi exponentielle simple, c'est-à-dire que la fraction éliminée par jour de la quantité présente dans l'organe est constante, on sait que beaucoup de données ⁽⁴¹⁾ tendent à prouver que cette fraction varie en raison inverse du temps et peut être mieux représentée par une fonction puissance. A la suite d'une injection unique de certains radionuclides ostéotropes, la quantité présente dans l'organisme a été exprimée par :

$$R(t) = A t^{-n} \quad t \geq 1 \quad (55)$$

où $R(t)$ = fraction de rétention t jours après l'injection.

A = fraction normalisée de la dose injectée retenue à la fin de l'unité de temps

n = constante.

Comme la rétention peut être différente selon que la substance est inhalée ou ingérée, un facteur f_1 doit être introduit pour représenter la fraction du radionuclide ingéré qui passe dans le sang circulant. Si le radionuclide est à vie longue, de telle sorte que l'on puisse négliger la décroissance radioactive, la quantité présente dans l'organisme après ingestion d'une quantité a par jour pendant T jours, est donnée par :

$$q = A a f_1 \int_0^T (T - \tau)^{-n} d\tau = \frac{A a f_1}{1 - n} T^{1-n} \text{ en } \mu\text{Ci} \quad (56)$$

Dans cette équation, on admet que n n'est pas voisin de 1. Dans le cas contraire, on doit faire l'intégration de 1 jour à T jours et ajouter la contribution du premier jour. En employant les notations précédentes, on a $a = P/f_e = 750 M = 750 \text{ (CMA)}_{\text{eau}}$ pour l'ingestion, ou $a = P/f_a = 6,9 \cdot 10^6 \text{ (CMA)}_{\text{air}}$ pour l'inhalation. T représente le temps d'exposition professionnelle qui est pris égal à 50 ans pour les valeurs données dans le tableau 1.

Si la période radioactive du radionuclide est du même ordre de grandeur que T , on peut également en tenir compte. Si la quantité présente dans l'organisme, $R(t)$, à la suite d'une injection intraveineuse unique, est une fonction puissance, la fraction éliminée par jour est donnée par

$$\frac{dR/dt}{R} = - \frac{n}{t} \quad (57)$$

qui représente seulement l'élimination biologique du radionuclide, parce que les expériences donnant les meilleures valeurs pour A et n sont généralement de courte durée par rapport à la période radioactive des radionuclides considérés ici (Sr, Ra, Pu et U) ; donc, en incluant la décroissance radioactive :

$$\frac{dR}{dt} = - \frac{n}{t} R(t) - \lambda^r R(t) \quad (58)$$

où λ^r est la constante de décroissance radioactive du radionuclide, en jours.

On voit facilement que l'intégrale de cette équation, avec $R(1) = A$, est :

$$R(t) = A t^{-n} e^{-\lambda^r (t-1)} \quad t > 1 \quad (59)$$

Donc, si le radionuclide subit une décroissance radioactive appréciable pendant qu'il est éliminé de l'organisme selon une fonction puissance, la quantité présente dans l'organisme dans les mêmes conditions que précédemment est donnée par :

$$q = a A f_1 \int_0^T (T - \tau)^{-n} e^{-\lambda^r (T - \tau - 1)} d\tau = a A f_1 \int_0^T u^{-n} e^{-\lambda^r (u-1)} du \quad \mu\text{Ci} \quad (60)$$

ou

$$(\text{CMA})_{\text{air}} = \frac{q}{6,9 \times 10^6 A f_1 \int_0^T u^{-n} e^{-\lambda^r (u-1)} du} \quad \mu\text{Ci/cm}^3 \quad (61)$$

et

$$(\text{CMA})_{\text{eau}} = \frac{q}{750 A f_1 \int_0^T u^{-n} e^{-\lambda^r (u-1)} du} \quad \mu\text{Ci/cm}^3 \quad (62)$$

Cette intégrale peut être évaluée à l'aide d'une table de la fonction Γ incomplète ⁽⁴²⁾.

Dans le cas où le radionuclide a des produits de filiation qu'il faut prendre en considération, l'estimation de l'élimination selon une fonction puissance peut encore être retenue. En principe, les produits de filiation peuvent être éliminés à des vitesses assez différentes de celles des parents, autrement dit la constante n peut être différente pour des éléments différents de la chaîne. Dans de tels cas, la valeur de n variera d'un élément à l'autre de la chaîne. Les formules utilisées dans ce cas seront similaires à celles données plus haut.

Par exemple, dans le cas de ^{228}Ra , il semble avantageux de considérer les éléments d'une chaîne. Comme tous ces éléments sont fixés fortement dans l'organisme, les produits de filiation à période radioactive de l'ordre de quelques heures ou quelques jours peuvent être considérés comme décroissant immédiatement et on discutera seulement le cas d'une chaîne de deux radionuclides. De plus, on admet que n a la même valeur pour chacun de ces radionuclides.

Si $R_0(t)$ et $R_1(t)$ désignent respectivement les quantités (μCi) de l'élément parent et du produit de filiation présentes dans l'organisme au temps t jours après une injection de 1 μCi de l'élément parent, les équations différentielles régissant les variations avec le temps sont :

$$\frac{dR_0}{dt} = \frac{-n}{t} R_0(t) - \lambda_0^r R_0(t) \quad (63)$$

$$\frac{dR_1}{dt} = \frac{-n}{t} R_1(t) - \lambda_1^r R_1(t) + \lambda_1^r R_0(t) \quad (64)$$

La solution qui fait apparaître une quantité A pour l'élément parent et une quantité 0 pour les produits de filiation à $t = 1$, est donnée par

$$R_0(t) = A t^{-n} e^{-\lambda_0^r (t-1)} \quad (65)$$

$$R_1(t) = \frac{A \lambda_1^r t^{-n}}{\lambda_1^r - \lambda_0^r} \left[e^{-\lambda_0^r (t-1)} - e^{-\lambda_1^r (t-1)} \right] \quad (66)$$

Au facteur $A t^{-n}$ près, ces équations sont identiques à la forme développée de l'équation (9). Cette solution est valable seulement si $n \ll 1$, mais ceci est vrai dans tous les cas pratiques considérés ici. Le choix de la solution pour laquelle $R_0(1) = A$ et $R_1(1) = 0$ néglige la formation des radionuclides de filiation pendant le premier jour. Cette approximation semble justifiée, puisqu'elle n'est appliquée ici qu'à des radionuclides ayant des périodes radioactives assez longues et que la fonction puissance ne représente pas correctement le comportement du radionuclide pour des temps courts après l'injection.

Si une quantité, $a \mu\text{Ci}$, est introduite par jour dans le sang pendant un laps de temps de T jours, la quantité de i^{e} isotope présente dans l'organisme après T jours est donnée par

$$a \int_0^T R_i (T-t) dt \quad (67)$$

ce qui conduit à une fonction I' incomplète qui peut être évaluée comme précédemment. Après avoir ainsi estimé les quantités présentes dans l'organisme, on peut déterminer les $(\text{CMA})_{\text{air}}$ et les $(\text{CMA})_{\text{eau}}$ par la méthode utilisée lors de l'établissement des équations (61) et (62).

Actuellement, l'utilisation d'une fonction puissance n'est possible que dans quelques cas. Il semble que la fonction puissance ne représente pas avec précision la situation exacte, puisqu'on a constaté que l'exposant n varie avec le temps ⁽⁴³⁾. Cependant, pour les radionuclides à période physique longue, la fonction puissance semble effectivement représenter de manière correcte les données dont on dispose sur l'exposition de longue durée. Sa signification métabolique reste malheureusement inexplicée et il ne semble pas souhaitable d'extrapoler une formule empirique très au-delà du domaine où elle a été vérifiée expérimentalement. A titre de comparaison, les valeurs des CMA ont été évaluées à la fois selon le modèle exponentiel et selon la loi de puissance pour les radioisotopes de Sr, Ra, Pu et U qui ont une période effective dépassant 20 jours. Dans ces derniers cas, le Comité, en choisissant les valeurs rassemblées dans le tableau 1, a pris en considération les valeurs des CMA obtenues par la méthode de la fonction puissance aussi bien que celles obtenues par la méthode de la fonction exponentielle. Les valeurs des constantes adoptées et les valeurs des CMA obtenues pour les isotopes les plus importants de ces quatre éléments sont réunies dans le tableau B. Ces valeurs ont été choisies par un Sous-Comité sur la Fonction Puissance.*

Dans les cas considérés, la méthode de la fonction puissance semble donner une estimation des valeurs des CMA supérieure à celle obtenue par la méthode exponentielle. Comme, en principe, les données relatives à la rétention peuvent être représentées par une courbe à exponentielles multiples, ce résultat est indubitablement dû en grande partie au fait que, par prudence, on a pris une période biologique longue ainsi qu'une valeur assez élevée pour la fraction de substance dans le sang qui possède cette longue période, c'est-à-dire f_2' . Bien que les valeurs

* Les données du tableau B ont été établies et approuvées par un sous-comité spécial créé pour étudier l'application de la fonction puissance au calcul des CMA. Les membres de ce sous-comité étaient : LANGHAM W. H. Président, ANDERSON E. C., HARRIS P., HEALY J. W., NORRIS W. P. et SNYDER W. S.

des CMA indiquées dans le tableau ci-joint aient été prises en considération par le Comité lors de son choix définitif, il ne faut pas les considérer comme des valeurs recommandées. Elles ont été données pour montrer que le Comité a examiné avec beaucoup d'attention cette méthode d'estimation et pour stimuler les recherches relatives à l'interprétation et à la validité de ce modèle. La présentation au tableau 12 des données biologiques établies sur la base du modèle exponentiel est en grande partie dictée par un souci de présentation homogène et simplifiée des données.

Tableau B. Valeurs des CMA calculées à partir du modèle de fonction puissance (168 heures/semaine)

Radionuclides et constantes de rétention	(CMA) _{eau} ($\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$)	(CMA) _{air} ($\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$)	Organe critique
Strontium $A = 0,65, n = 0,35$			
^{85}Sr	6×10^{-8}	5×10^{-7}	Os
^{89}Sr	4×10^{-4}	4×10^{-8}	Os
^{90}Sr	8×10^{-6}	7×10^{-10}	Os
Strontium $A = 0,95, n = 0,25$			
^{85}Sr	3×10^{-8}	2×10^{-7}	Os
^{89}Sr	2×10^{-4}	2×10^{-8}	Os
^{90}Sr	6×10^{-6}	5×10^{-10}	Os
Radium $A = 0,54, n = 0,52$			
^{226}Ra	1×10^{-6}	1×10^{-10}	Os
^{228}Ra	2×10^{-6}	1×10^{-10}	Os
Uranium $A = 0,72, n = 0,80$			
^{238}U	8×10^{-4}	4×10^{-11}	Rein
U-nat	8×10^{-4}	4×10^{-11}	Rein
Plutonium $A = 0,99, n = 0,01$			
^{238}Pu	5×10^{-5}	6×10^{-13}	Os
^{239}Pu	4×10^{-5}	5×10^{-13}	Os
^{240}Pu	4×10^{-5}	5×10^{-13}	Os
^{241}Pu	2×10^{-8}	3×10^{-11}	Os
^{242}Pu	5×10^{-5}	6×10^{-13}	Os

BIBLIOGRAPHIE

1. Maximum permissible amounts of radioisotopes in the human body and maximum permissible concentrations in air and water. *Report of National Committee on Radiation Protection (Rapport du Comité National de Protection contre les Radiations)*. National Bureau of Standards Handbook 52 - Superintendent of Documents, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., (1953).
2. Recommandations de la Commission Internationale de Protection contre les Radiations. *J. Radiol. Electrol.*, 1955, **36**, n° 10bis. (Réunion du Congrès International de Radiologie, Copenhague, Danemark, juillet 1953).
3. *Recommandations de la Commission Internationale de Protection Radiologique*, 9 septembre 1958. Pergamon Press.
4. Maximum permissible exposures to man. A preliminary statement of the National Committee on Radiation Protection and Measurement. (Addendum, 15 April 1958). Maximum permissible radiation exposures to man. *Report of National Committee on Radiation Protection*, National Bureau of Standards Handbook 59 (Addendum, 8 January 1957), Superintendent of Documents, U.S. Government Printing Office, Washington D.C.
5. MEDICAL RESEARCH COUNCIL. *The Hazards to Man of nuclear and allied Radiation*, Cmd. 9780, Her Majesty's Stationery Office, London, 1956.
National Academy of Science, publication 452, Pathologic effects of atomic radiation, NAS-NRC, Washington, D.C., 1956. *The Biological Effects of Atomic Radiation*, Summary Reports, NAS-NRC, Washington, D.C., 1956 ; *The Biological Effects of Atomic Radiation - A Report to the Public*, NAS-NRC, Washington, D.C., 1956 ; *The Biological Effects of Atomic Radiation — Gonadal Dose from the Medical Use of X-rays* (preliminary report of Section III by J. S. Laughlin and I. Pullman), NAS-NRC, Washington, D.C., 1957.
6. *Rapport du Comité Scientifique des Nations-Unies pour l'étude des effets des radiations ionisantes*. Assemblée Générale, documents officiels : treizième session, supplément n° 17 (A/3838), New-York, 1958 ; Annexe G. *Effets somatiques des radiations chez les mammifères*, p. 169-189. Effets génétiques des radiations chez l'homme. *Rapport de l'Organisation Mondiale de la Santé*, O.M.S., Palais des Nations, Genève, 1957.
7. Report on amendments to the recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP). *Radiology*, 1958, **70**, 261-262.
Report on amendments during 1956 to the Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *Acta Radiol.*, 1957, **48**, 493-495 ; *Brit. J. Radiol.*, 1958, **31**, 93-94 ;
Réunion de la Commission Principale et des présidents des Comités de la Commission Internationale de Protection Radiologique, New-York City, 3-5 Mars 1958.
8. Toutes les références bibliographiques concernant les données scientifiques citées dans ce rapport sont données sous forme abrégée. Elles sont données intégralement dans *Bibliography for Biological Data, Health Physics*, 1959, vol. 3. Voir Col-1, Fk-6, Fr—6, Fr—8, Ja—7, Ja—8, Swi—1, Swi—2 et Zr—1.
9. *Chalk River Conference on Permissible Dose*. Une conférence des représentants du Royaume-Uni, du Canada et des États-Unis, réunis à Chalk-River, Canada, 29 et 30 septembre 1949, RM—10 (1950).
10. Cf. références Bg—1 à Bg—6, Gro—1, Kc—1, Kc—2, Kh—4, Led—1, Rm—2, Sti—1 à Sti—4, Ti—1 à Ti—7 et Tie—1.
11. *Report of the International Commission on Radiological Units and Measurements (ICRU)*, 1956, National Bureau of Standards Handbook 62. Superintendent of Documents, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1957.
12. *Safe Handling of Radioactive Luminous Compound*, National Bureau of Standards, Handbook H27. Superintendent of Documents, Washington, D.C., 1941.
13. Cf. références Hu—1, Hu—8, Hu—9, Hu—12, Hu—16, Mac—1, Mac—2, Mut—2, Pal—1, Pal—2, Ste—1 à Ste—4 et Sy—1.

14. Cf. références Hk — 1, Mr — 1 et No — 7.
15. Cf. référence Ha — 93.
16. Cf. références Br—12, Fk—4 et Fk—7.
17. Cf. références And — 1 et Stn — 3 à Stn — 5.
18. Cf. références Br — 44 et No — 7.
19. Cf. référence Ea — 5.
20. Cf. références Bv-1, Ln — 22 et Lr — 5.
21. Cf. références Bh — 3, Bog — 1, Mkz — 1 et Nrc — 1.
22. Cf. références Lb — 13, Spi — 5 et Va — 2.
23. Cf. référence Fu — 1.
24. Cf. références Rut — 1 et Sny — 2.
25. Cf. référence Th — 26.
26. Cf. références Cl — 2, Sf — 1 et Sf — 2.
27. Cf. référence Mkz — 2.
28. Les données nucléaires utilisées pour ces calculs ont été prises dans les références suivantes : Fie — 1, Hoa — 1, Noc — 2 et Sul — 1.
29. Cf. référence Br — 10.
30. Cf. référence Ma — 3.
31. International recommendations on radiological protection. (Révisées par la Commission Internationale de Protection contre les Radiations au Sixième Congrès International de Radiologie, Londres, 22-29 juillet 1950). *Brit. J. Radiol.*, 1951, 24, 46-53; *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection and of the International Commission on Radiological Units*, National Bureau of Standards Handbook 47. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1950.
32. *Tripartite Conference on Permissible Dose*. Arden House, Harriman, New-York, 30 et 31 mars et 1 avril 1953. (Une Conférence des représentants du Royaume-Uni, du Canada et des États-Unis).
33. *Septième Congrès International de Radiologie et Conférences simultanées de la Commission Internationale de Protection contre les Radiations* (Réunion tenue à Copenhague, Danemark, 13-24 juillet 1953).
34. Cf. référence Po — 5.
35. Une réunion commune des délégations des États-Unis, du Canada et de Grande-Bretagne a eu lieu à Buckland House, près de Faringdon, Berkshire, les 4, 5 et 6 août 1950. (Compte-rendu de la réunion rédigé par L. D. Marinelli pour la délégation des États-Unis).
36. *Conférence de la Commission Internationale de Protection contre les Radiations sur la Radiobiologie et la Protection contre les Radiations* (tenue le 15 septembre 1952 à l'Institut de Radiophysique, Stockholm, Suède). (Réunion du 18 septembre 1952, à Uppsala, des membres de la Commission participant à la Conférence de Radiologie de Stockholm).
37. *Huitième Congrès International de Radiologie*. (Calle del Oio, Mexico, 22-28 juillet 1956). *Réunion commune CIPR/CIUR* (sujet : Expositions à des fins médicales), 31 octobre-7 novembre 1956 New-York.
Réunion à Genève, Suisse, 23 avril — 1^{er} mai 1957 (groupes de travail). *Exposure of man to ionizing radiation arising from medical procedures: an inquiry into methods of evaluation. Rapport de la CIPR et de la CIUR. Phys. in Med. and Biol.*, 1957, 2, 107-151.
38. *Réunion commune des membres américains des Sous-Comités de la dose d'irradiation interne du CNPR et de la CIPR*, 10-11 décembre 1956, Washington, D.C.
39. *Réunion de la CIPR* (New-York, 3-12 mars 1958).
40. Cf. références Ma — 2 et Th — 18.
41. Cf. références Ber — 4, Hy — 6, Ln — 12, Mn — 11, Mn — 13, No — 7, No — 9 et Sny — 1.
42. Cf. références Jh — 1, Pea — 1 et Pea — 2.
43. Cf. référence War — 2.

INDEX

	PAGE		PAGE
Age 18	4	Thorium	12
Aliments	31	Uranium	12
Alpha (particules), dans le tractus GI	24	Débit respiratoire	11, 158
Bases fondamentales de l'exposition interne		Dose génétique	7
Bases pour l'estimation des valeurs maximales admissibles d'exposition interne	14	Eau (ingestion d')	11, 158
Modifications apportées aux recommandations fondamentales de la C.I.P.R.	1	Efficacité biologique relative (EBR)	12, 33
Normes d'exposition interne maximale admissible	3	Éléments	
Radium dans l'os, norme fondamentale	4, 15	Distribution des éléments stables et à l'état de traces	9
Calcul des concentrations maximales admissibles		Tableau 6	152
Base des calculs	3, 8	Tableau 7	153
Chaînes: parent — produits de filiation	10, 20	Gaz rares	11
Débit respiratoire	11, 158	CMA, gaz rare	25
Équilibre	10	Immersion dans un gaz rare	25
Gaz inertes	11	Hydrogène	26
Homme standard	34	Radium	15
Ingestion d'eau	11	Dans l'os	4, 16
Modèle à compartiments	10	Utilisation comme norme fondamentale	14, 15, 16
Modèle de la fonction puissance	10, 40	Radon	10, 26
Origine des données	2, 8, 9	Thorium	
Période d'exposition	10	Comparaison avec Pu et U	85
Période d'exposition professionnelle	10, 11	Curie	12
Période prolongée d'exposition professionnelle	11	Uranium	
Solubilité	9	Effets toxiques	12
Toxicité	12	Curie	12
Valeurs relatives à l'air et à l'eau	9	Énergie effective	4, 32
Valeurs relatives aux aliments	9, 31	Chaînes: parent — produits de filiation	20, 33
GI (tractus)	23	Tableau 5	94
Particules alpha	24	Tableau 5a	118
Mélanges de radionuclides	28	Equations	
Tableau A	30	1. q — établi sur la base de $0.1 \mu\text{Ci}$ ^{226}Ra	16
Modifications à apporter en raison de:		2. q — établi sur la base d'un débit de dose maximal admissible de R rems/semaine	19
Absorptions uniques importantes	21	3. q — établi sur la base d'un débit de dose maximal admissible de 0.3 rem/semaine	19
Age	4, 6	4. q — établi sur la base d'un débit de dose maximal admissible de 0.3 rem/semaine	19
Aliments	31	5. q — modèle exponentiel	19
Énergie	10	6. q — modèle exponentiel	19
Équilibre	10	7. $(\text{CMA})_{\text{air}}$	20
Solubilité	9	8. $(\text{CMA})_{\text{eau}}$	20
Temps	10, 11	9. qf_2 pour ingestion unique	21
Toxicité	12	10. qf_2 pour ingestion continue	21
Organes autres que le tractus GI	19	11. Débit de dose en rems/semaine résultant de l'ingestion continue	22
Radionuclides non identifiés	27	12. $(\text{CMA})_{\text{air}}$	22
Tableaux 3 et 4	92, 93	13. $(\text{CMA})_{\text{eau}}$	22
Restrictions à l'application	8	14. Débit de dose en rems/semaine délivré aux parois du tractus GI	23
Tableau 1	47	15. $(\text{CMA})_{\text{air}}$ pour tractus GI. Isotope sans produits de filiation	23
Catégories d'exposition	3		
Curie			
Définition	12		

	PAGE		PAGE
15'. (CMA) _{air} pour tractus GI. Radionuclide parent d'une chaîne de k produits de filiation	23	46. f_a pour substances solubles	37
16. (CMA) _{eau} pour tractus GI. Isotope sans produits de filiation	23	47. f_e pour substances solubles	38
16'. (CMA) _{eau} pour tractus GI. Radionuclide parent d'une chaîne de k produits de filiation	23	48. Période biologique	38
17. Débit de dose en rem/semaine délivré à l'estomac	24	49. }	39
18. (CMA) _{air} pour l'estomac. Isotope sans produits de filiation	24	50. } Période effective	39
18'. (CMA) _{air} pour l'estomac. Radionuclide parent d'une chaîne de k produits de filiation	24	51. }	39
19. (CMA) _{eau} pour l'estomac. Isotope sans produits de filiation	24	52. } Équations d'équilibre	39
19'. (CMA) _{eau} pour l'estomac. Radionuclide parent d'une chaîne de k produits de filiation	24	53. }	39
20. (CMA) _{air} de gaz rares	25	54. Contrôle de la concentration	39
21. (CMA) _{air} de gaz rares, lorsque le débit de dose maximal admissible est de 0,1 rem/semaine	25	55. Fonction puissance. Quantité présente dans l'organisme après injection intraveineuse	40
22. } CMA de mélanges connus de radionuclides, pour l'organe x	28	56. Fonction puissance. Quantité présente dans l'organisme après ingestion	40
24. CMA d'un mélange connu de radionuclides, pour l'organisme entier	28	57. Fonction puissance. Fraction éliminée chaque jour	40
25. Énergie effective pour un rayonnement β^-	32	58. } Fonction puissance.	40
26. Énergie effective pour un rayonnement β^+	32	59. }	41
27. Énergie effective pour un rayonnement γ	33	60. Quantité présente dans l'organisme déterminée à l'aide du modèle de la fonction puissance	41
28. Énergie effective pour un rayonnement α	33	61. (CMA) _{air} — modèle de la fonction puissance	41
29. Énergie effective pour une conversion interne, e^-	33	62. (CMA) _{eau} — modèle de la fonction puissance	41
30. Énergie effective pour un rayonnement X de capture K et L	33	63. }	41
31. Reculs atomiques à la suite d'une émission α	33	64. }	41
32. }	33	65. } modèle de la fonction puissance	41
33. } Énergies effectives dans le cas de chaînes avec produits de filiation	34	66. }	41
34. }	34	67. }	42
35. }	34	Équilibre	10
36. f_2 dans les conditions d'équilibre d'une exposition continue	36	Exposition	
37. f_2 à partir de données relatives à une exposition unique	36	Catégories	3
38. f_2 à partir de données à long terme relatives à une exposition unique	36	Débit	10
39. f_2 à partir de données obtenues par administration intraveineuse unique	37	40h/semaine	2
40. }	37	13 semaines (pris comme base d'exposition)	5, 6
41. }	37	Dentaire	4
42. } f_2 à partir de données relatives à une exposition unique	37	Gonades	4, 6
43. }	37	Groupes spéciaux	3, 6
44. }	37	Continue (168 h/semaine)	2
45. }	37	40 h/semaine	2
		Médicale	4
		Os	4, 14, 15, 16, 17, 18
		Population	7
		Dose génétique	7
		Dose somatique	7
		Exposition du public	3
		Professionnelle	4
		Débit	10
		Normes fondamentales	4
		Réduction en cas d'exposition externe simultanée	5, 6
		Facteurs de conversion	
		CMA d'exposition professionnelle continue en dose génétique pour grandes populations	7
		CMA d'exposition professionnelle continue en dose somatique pour grandes populations	7
		CMA pour 40 h/semaine en CMA pour 168 h/semaine	20

	PAGE		PAGE
Facteur de dommage relatif	4, 15, 33	Rad	12
Fonction exponentielle (modèle de la)	19, 35	Radionuclides non identifiés	27
Fonction puissance (modèle de la)	40	Tableaux 3 et 4	92, 93
Gastro-intestinal (tractus)	23	Radium	4, 14, 15
Gaz inertes	11, 25, 26	Radon	10, 26
Génétique (dose)	7	Relations entre radionuclides et produits de filiation dans l'organisme	10
Gonades (exposition des)	4	Rem	12
Groupes spéciaux (exposition des)	3, 6	Squelette	4, 14, 15
Continue (168 h/semaine)	2	Symboles utilisés ayant une signification précise	
40 h/semaine	2	<i>C</i>	36
Hématopoïétiques (exposition des organes)	1, 6	<i>E</i>	16
Homme standard	34	Σ	16
Tableaux 6 à 11	152-159	E_m	32
Médicale (exposition)	4	EBR	33
Mélanges de radionuclides	28	<i>f</i>	32
Tableau A	30	f_1	36
Modèle à compartiments	10	f_2	36
Modèle de la fonction exponentielle	19, 35	f_2^*	36
Modèle de la fonction puissance	40	f_a	37
Organe (dose délivrée à un)		f_c	38
Tous organes autres que l'os, les gonades, la peau et la thyroïde	4	F_i	20, 33
Gonades	4, 6	<i>I</i>	36
Organes hématopoïétiques	1, 6	λ	19
Organisme entier	4, 6, 13	λ_r	21
Peau	4, 11, 14, 26	<i>m</i>	19
Squelette	4	<i>n</i>	4, 15, 33
Thyroïde	4, 14	<i>N</i>	4
Yeux (cristallin)	1	<i>P</i>	20
Organe critique	12	<i>q</i>	19
Organisme entier	4, 6, 13	qf_2	19
Os	4, 15	$(qf_2)^s$	21
Paramètres biologiques	18, 19, 20, 35	$(qf_2)_i^s$	23
Absorption continue	21	$(qf_2)_{\text{total}}$	23
Absorption unique	21	<i>R</i>	19, 22
Consommation d'eau	11	$\Sigma EF (EBR)_n$	34
Tableau 9	158	<i>t</i>	19
Débit respiratoire	11	<i>T</i>	19, 38
Tableau 9	158	T_b	19, 38
Effets latents	17	T_r	19
Homme standard	34	τ	23
Tableaux 6 à 11	152-159	Thorium	12
Modèle à compartiments	10	Comparaison avec Pu et U	85
Organe critique	12	Curie	12
Période biologique	38	Thyroïde	4, 14
Taux d'absorption	20	Toxicité	12
Peau	4, 11, 14, 26	Unités de rayonnement ionisant	
Période biologique	38	Curie	12
Professionnelle (exposition)	4	Rad	12
Débit	10	Rem	12
Normes fondamentales	4	Uranium	12
Réduction en cas d'exposition externe simultanée	5, 6	Curie	12
Public (exposition du)	3, 7	Effets toxiques.	12