CANADA : VIVRE AVEC LE RAYONNEMENT

Commission de contrôle de l'énergie atomique
Atomic Energy Control Board

Canada

Numérisé par
Éditions et Services de dépôt,
Travaux publics et Services
gouvernementaux Canada - 2014

Digitized by
Publishing and Depository Services,
Public Works and Government Services
Canada - 2014

Numéro de catalogue / Catalogue Number: CC172-7/1995F-PDF

ISBN 978-0-660-97491-0

Publications du gouvernement du Canada / Government of Canada Publications
publications.gc.ca

CANADA : VIVRE AVEC LE RAYONNEMENT

Commission de contrôle de l'énergie atomique
Atomic Energy Control Board

Canada

Données de catalogage avant publication (Canada)

Vedette principale au titre :

Canada: Vivre avec le rayonnement

Publ. aussi en anglais sous le titre : Canada: Living with Radiation
Comprend des références bibliographiques.
ISBN 0-660-94978-4
No de cat. CC172-7/1995F

1. Rayonnement -- Aspect hygiénique.
2. Rayonnement -- Sécurité -- Mesures.
I. Canada. Commission de contrôle de l'énergie atomique.
II. Canadian Nuclear Services
III. Titre: Canada : Vivre avec le Rayonnement

QC475.C3214 1995 363.17'99 C95-980091-3

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1995

En vente au Canada chez

votre libraire local

ou par la poste auprès du

Groupe Communication Canada-Édition
Ottawa, Canada K1A 0S9

N° de catalogue CC172-7/1995F
ISBN 0-660-94978-4

Also available in English

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES VII

REMERCIEMENTS IX

Chapitre 1 VIVRE AVEC LE RAYONNEMENT 1
Avantages et risques du rayonnement 1
L'inquiétude du public et la perception du risque 2

Chapitre 2 NOTIONS ET QUANTITÉS 5
Radioactivité et composition de la matière 5
Qu'est-ce que le rayonnement ionisant? 9
Réaction des tissus au rayonnement ionisant 11
Dosimétrie 13

Chapitre 3 LES SOURCES D'EXPOSITION AU RAYONNEMENT 17
L'exposition du public 17
L'exposition professionnelle 20

Chapitre 4 LES EFFETS BIOLOGIQUES DU RAYONNEMENT 21
Effets précoces d'une dose élevée 21
Effets tardifs d'une faible dose 21
Évaluation quantitative des risques de cancer 23
Évaluation quantitative des risques génétiques 28
Exposition *in utero* 30
Période de latence des effets tardifs 31

Chapitre 5 LES PRINCIPES DE LA RADIOPROTECTION 33
Pensée de base 33
Les trois grandes règles de la radioprotection 33
Justification 34
Optimisation 36
Limite de dose individuelle 37
Radioprotection des autres organismes vivants 41

Chapitre 6	LE RAYONNEMENT NATUREL	43
	Rayonnement cosmique	43
	Radionucléides d'origine cosmique	43
	Radionucléides primitifs	44
	Produits de désintégration du radon	46
	Doses totales	48
Chapitre 7	LES UTILISATIONS MÉDICALES	49
	Radiographies diagnostiques	50
	Tomodensitométrie	51
	Médecine nucléaire	53
	Radiothérapie	53
	Limitation des expositions à des fins diagnostiques	54
Chapitre 8	LES UTILISATIONS INDUSTRIELLES	55
	Radiographie industrielle	55
	Jauges nucléaires	57
	Analyse par activation neutronique	60
	Stérilisation des produits médicaux	64
	Conservation des aliments par irradiation	64
	Lutte contre les insectes nuisibles	66
	Détecteurs de fumée	67
	Technique des traceurs radioactifs	70
	Autres utilisations	70
Chapitre 9	L'EXPOSITION PROFESSIONNELLE	71
	Fichier national de dosimétrie	71
	Les mineurs d'uranium	74
	Les doses annuelles moyennes des mineurs autres que les mineurs d'uranium	75
	Exposition professionnelle du personnel navigant	75
	Exposition des astronautes	76

Chapitre 10 LE RAYONNEMENT DANS L'ENVIRONNEMENT 77
Retombées dues aux essais d'armes nucléaires 78
Accident nucléaire de Tchernobyl 79
Rejets de radionucléides dans l'environnement 80
Évacuation et gestion des déchets 81
Sources non nucléaires 83

Chapitre 11 L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE 85
Le réacteur CANDU 89
Sûreté des réacteurs 93
Réglage de la puissance d'un réacteur en conditions d'exploitation normale 94
Systèmes spéciaux de sûreté 94
Systèmes de refroidissement d'urgence 96
Systèmes de confinement 96

Chapitre 12 LA PLANIFICATION DES MESURES D'URGENCE 99
But de la planification des mesures d'urgence 99
Responsabilité de la planification des mesures d'urgence 100
Planification des mesures d'urgence sur le site 102
Planification des mesures d'urgence à l'extérieur du site 102

Chapitre 13 LA RÉGLEMENTATION DES RAYONNEMENTS IONISANTS 107
Les lois et leur administration 107
Réglementation des installations et des substances nucléaires, et délivrance des permis 108
Réglementation des substances nucléaires 108
Réglementation de la gestion des déchets radioactifs 109
Transport des substances radioactives 110
Résultats de la réglementation 110

Chapitre 14	AUTRES SOURCES D'INFORMATION	113
	Sources internationales	113
	Sources canadiennes	114
Chapitre 15	SYMBOLES ET UNITÉS	117
	Unités historiques	117
	Unités de rayonnement	118
	Symboles de la radioprotection	119
	Préfixes SI	120
Chapitre 16	GLOSSAIRE	123

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Le spectre électromagnétique	2
Figure 2.1	Modèle atomique de l'hydrogène	6
Figure 2.2	Courbe de désintégration	6
Figure 2.3	Chaîne de désintégration radioactive	8
Figure 2.4	Appareil de radiographie	10
Figure 2.5	Rayons alpha, bêta et gamma dans un champ magnétique	11
Figure 2.6	Molécule d'eau	11
Figure 2.7	Densité des rayons alpha et bêta	12
Figure 3.1	Débits de dose de rayonnement gamma provenant du sol canadien	19
Figure 6.1	Types de rayonnement	44
Figure 8.1A	Enceinte d'exposition à obturateur pivotant, source cachée	56
Figure 8.1B	Enceinte d'exposition à obturateur pivotant, source exposée	56
Figure 8.2	Appareil radiographique à furet	57
Figure 8.3	Régulation du niveau au moyen d'une source radioactive	58
Figure 8.4	Jauge à transmission pour contrôler un écoulement de charbon	58
Figure 8.5	Jauge de densité du sol - type à transmission	59
Figure 8.6	Jauge de densité du sol - type à rétrodiffusion	59
Figure 8.7	Contrôleur d'épaisseur du papier	60
Figure 8.8	Séquence des événements dans une réaction (n,γ) type	61
Figure 8.9	Analyseur en direct de charbon en vrac	62
Figure 8.10	Diagraphie d'un puits à l'aide d'une source de neutrons	63
Figure 8.11	Irradiateur d'aliments	65
Figure 8.12	Décès par le feu dans divers pays	68
Figure 8.13	Le rayonnement produit un courant électrique dans une chambre d'ionisation	69
Figure 8.14	Détecteur de fumée à chambre d'ionisation	69

Figure 9.1 Dosimètre thermoluminescent 72
Figure 9.2 Dose moyenne au corps entier selon l'année (catégories d'emploi choisies) 73
Figure 9.3 Distribution sur cinq ans de la dose reçue par les travailleurs des centrales nucléaires canadiennes, 1986-1990 74

Figure 10.1 Principales voies d'exposition après un rejet de radionucléides dans l'environnement 77
Figure 10.2 Production et utilisation de combustible nucléaire/ gestion des déchets 80

Figure 11.1 Fission de l'atome 85
Figure 11.2 Réactions en chaîne 86
Figure 11.3 Cœur du réacteur 88
Figure 11.4 Centrale nucléaire 88
Figure 11.5 Carte des centrales nucléaires canadiennes 91
Figure 11.6 Grappe de combustible 91
Figure 11.7 Système générateur du réacteur CANDU (centrale à plusieurs réacteurs) 92
Figure 11.8 Fission de l'atome d'uranium 95
Figure 11.9 Système d'arrêt - Injection de "poison" liquide et barres d'arrêt 95
Figure 11.10 Système de confinement d'une centrale à plusieurs réacteurs 97

Figure 12.1 Principales voies d'exposition à la suite d'un rejet accidentel de substances radioactives à partir d'un réacteur 101

Figure 13.1 Répartition des titulaires de permis de radio-isotopes 109
Figure 13.2 Contenant de déchets radioactifs pour le stockage provisoire du combustible épuisé 111

Figure 15.1 Doses, limites de dose et effets 122

Remerciements

La présente publication s'inspire en partie du guide d'information *Living with Radiation* du National Radiological Protection Board (NRPB) du Royaume-Uni. La Commission de contrôle de l'énergie atomique du Canada remercie le NRPB de lui avoir permis d'en reproduire des sections.

Canada : Vivre avec le rayonnement a été rédigée pour la Commission de contrôle de l'énergie atomique par Canadian Nuclear Services, 1400, rue Bayly, Office Mall 2, Suite 10, Pickering (Ontario), L1W 3R2. Ses auteurs sont M. David Myers de Pembroke (Ontario), M. Peter Barry de Deep River (Ontario) et M. Robert Wilson de West Hill (Ontario), également rédacteur en chef. La Commission exprime également sa gratitude à M. David McMillan, chef du Département de chimie, ainsi qu'aux étudiants Courtney Armstrong, Rob Bennet, Mark Johannsen et Mary Anne Rogers, tous du Sir Oliver Mowat Collegiate de Scarborough (Ontario), qui ont revu le document.

Version française établie avec la collaboration du Bureau de la traduction, Services de la traduction scientifique.

CHAPITRE 1

VIVRE AVEC LE RAYONNEMENT

Chaque jour, les Canadiens et Canadiennes sont exposés à divers rayonnements d'origine naturelle. La chaleur et la lumière du Soleil, essentielles à la vie, en sont des exemples familiers. Le Soleil, comme toute étoile, est aussi la source d'autres rayonnements qui sont imperceptibles. Le radium et l'uranium sont des substances naturelles qui émettent du rayonnement, et qu'on a donc appelées *radioactives*. Il existe également diverses formes de rayonnement artificiel qui font largement partie de la vie moderne, telles les ondes de radiotélévision et les micro-ondes. Les rayons X, autre forme bien connue de rayonnement, sont couramment utilisés en médecine, de même que d'autres substances radioactives artificielles. Ces substances émettent du rayonnement, tout comme les substances radioactives naturelles.

En fonction des effets qu'ils produisent dans la matière, deux types de rayonnement ont été définis : *ionisant* et *non ionisant*. Le rayonnement ionisant (voir chapitre 2) comprend les rayons X et les divers rayonnements émis par les substances radioactives. Le rayonnement non ionisant comprend le rayonnement thermique (la chaleur), la lumière visible, le rayonnement ultraviolet, les ondes radioélectriques et les ondes radar (figure 1.1). Tout rayonnement, s'il est suffisamment intense, semble produire des effets biologiques nocifs.

AVANTAGES ET RISQUES DU RAYONNEMENT

Les avantages du rayonnement non ionisant naturel sautent aux yeux. Sans la chaleur et la lumière reçues du Soleil sous forme de rayonnement, la vie n'existerait pas sur Terre.

De nos jours, nous produisons artificiellement de nombreuses formes de rayonnement ionisant et non ionisant dont les utilisations bénéfiques sont largement répandues. Le rayonnement non ionisant est à la base même des télécommunications modernes; il permet d'éclairer nos rues la nuit et, dans l'ensemble de l'industrie, on s'en sert dans les procédés modernes de construction (lasers) et d'analyse chimique. Le rayonnement ionisant artificiel est utilisé couramment en médecine pour le diagnostic et le traitement des tumeurs, et dans l'industrie pour la mesure des niveaux et le contrôle de la

qualité des soudures. Il sert aussi à la stérilisation du matériel médical et même à la répression de certains insectes ravageurs.

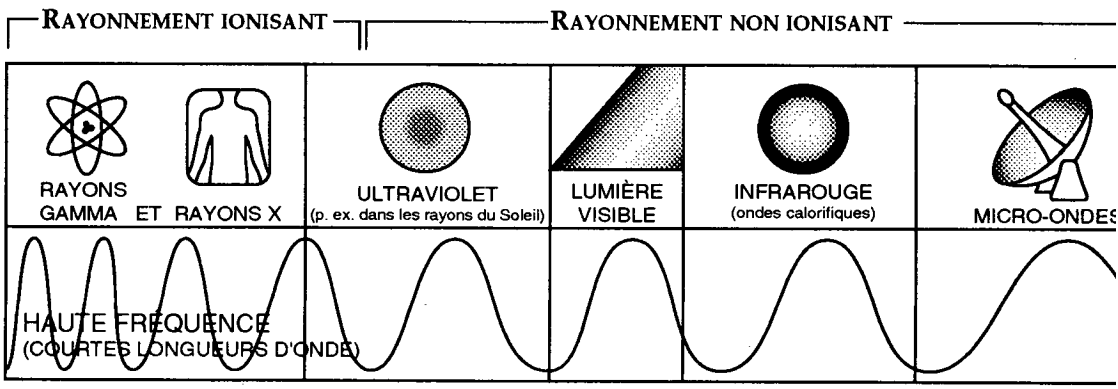
Le rayonnement ionisant doit être utilisé avec prudence. Peu après la découverte des rayons X à la fin du XIXe siècle, on a observé les effets nocifs du rayonnement ionisant. Comme pour toutes les autres formes de rayonnement, l'exposition au rayonnement ionisant doit être bien contrôlée, de sorte que nous puissions profiter des avantages sans éprouver les effets nocifs. L'effet le plus nocif susceptible de résulter des niveaux d'exposition courants au rayonnement ionisant naturel ou artificiel est une légère augmentation du taux de cancer et peut-être des tares héréditaires chez les groupes exposés. Ce ne sont pas toutes les personnes exposées ou leurs enfants qui souffriront de ces effets, mais le risque qu'ils en souffrent est accru. Ainsi, le taux de cancer sur la durée de vie d'une population non exposée peut être de 26 %, et de 27 % dans le cas d'une population exposée.

Profiter des avantages du rayonnement ionisant sans en subir d'effets nocifs n'est pas tâche facile. Il faut en effet surveiller de près les sources de rayonnement ainsi que les niveaux d'exposition. Les pratiques qui n'offrent que des avantages accessoires mais qui produisent une exposition importante devraient être interdites, ou abandonnées, comme ce fut le cas de l'emploi des rayons X par les marchands de chaussures pour vérifier le bon ajustement de la chaussure au pied du client. Le jeu n'en valait pas la chandelle.

L'INQUIÉTUDE DU PUBLIC ET LA PERCEPTION DU RISQUE

Des enquêtes ont montré que bien des gens comprennent mal les risques associés aux activités de la vie moderne. Ainsi, certains ne prennent pas l'avion

FIGURE 1.1
LE SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

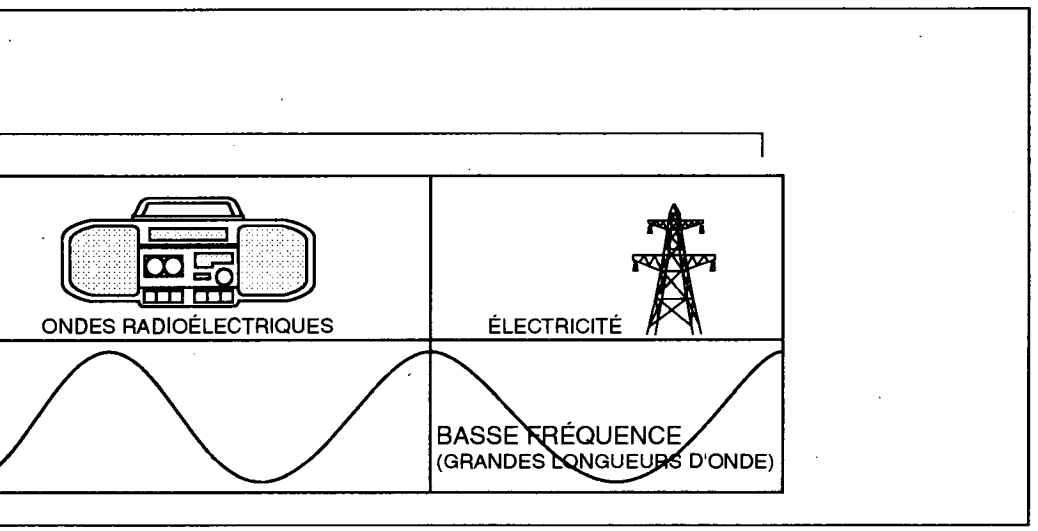


QUELQUES UTILISATIONS BÉNÉFIQUES DU RAYONNEMENT

Ionisant	Non ionisant
Diagnostic médical	Radio
Traitement du cancer	Télévision
Mesure des densités et des niveaux	Radar
Contrôle des soudures	Télécommunications hertziennes
Stérilisation d'instruments médicaux	Cuisine par micro-ondes
Répression de certains insectes	Chauffage par infrarouge
Conservation des aliments	Éclairage
Dispositifs de sécurité (détecteurs de fumée)	Chirurgie laser, etc.

parce qu'ils perçoivent qu'il est peu sûr, mais conduisent leur automobile sans aucune inquiétude. Pourtant, au Canada, le risque par kilomètre parcouru de mourir d'un accident d'aviation est beaucoup moindre que celui de mourir au volant.

Bon nombre de personnes estiment également que l'exposition au rayonnement ionisant provenant de substances radioactives présente un risque élevé. Peut-être parce qu'elles associent le rayonnement ionisant aux armes nucléaires, ou encore parce que le rayonnement ionisant est mystérieux et que, comme la plupart des autres types de rayonnement, exception faite de la lumière et de la chaleur, il est imperceptible. Peut-être aussi parce qu'il est une cause possible du cancer, maladie terrible pour beaucoup. Quoi qu'il en soit, on a peur du rayonnement ionisant. Le lecteur trouvera dans la présente publication de plus amples renseignements sur ce rayonnement, sur ses utilisations ainsi que sur ses risques qui seront mis en perspective avec les risques d'autres activités et pratiques de la vie moderne.



CHAPITRE 2

NOTIONS ET QUANTITÉS

RADIOACTIVITÉ ET COMPOSITION DE LA MATIÈRE

Ce n'est que vers la fin du XIXe siècle qu'on a découvert que l'être humain avait toujours vécu en présence de faibles quantités de rayonnements ionisants. Les premiers rayonnements ionisants découverts furent les rayons X en 1895, alors que la radioactivité naturelle fut découverte en 1896. On sait maintenant que l'Univers, la Terre et même nos propres corps sont naturellement radioactifs. La faible radioactivité naturelle de nos corps ne semble pas nous servir d'aucune façon; elle résulte simplement de la radioactivité naturelle de la Terre et du reste de l'Univers. La chaleur du centre de la Terre, qui est à l'origine de certains phénomènes naturels comme les volcans, les sources d'eau chaude, la dérive des continents et la formation de chaînes de montagnes, dépend dans une large mesure de sa radioactivité naturelle.

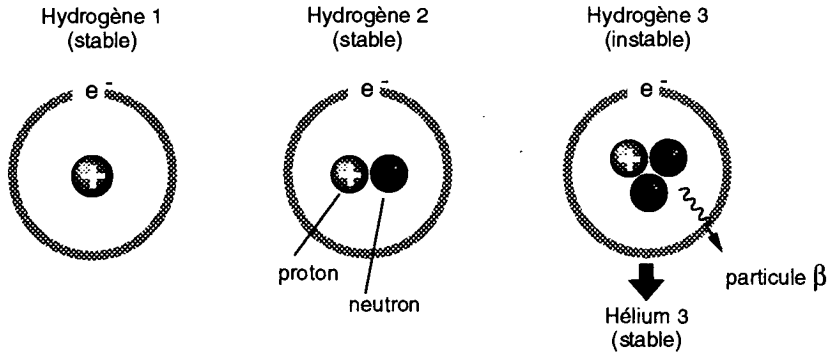
Pour comprendre la radioactivité naturelle, il est utile d'avoir des notions de la composition de la matière. La matière est composée d'*éléments*; les éléments les plus abondants dans nos organismes sont l'hydrogène, le carbone, l'azote, l'oxygène, le sodium, le potassium, le calcium, le chlore et le phosphore.

Les éléments sont constitués d'*atomes* particuliers, dont la partie centrale appelée *noyau* est très petite, ainsi que de un à environ cent *électrons* encore plus petits. Ces derniers gravitent autour du noyau, à peu près de la même manière que la Terre et les autres planètes gravitent autour du Soleil.

L'atome d'hydrogène est le plus simple de tous. Le noyau d'hydrogène est constitué d'une particule chargée positivement appelée *proton*, autour de laquelle gravite un électron chargé négativement. Les charges positive et négative sont en équilibre, de sorte que l'atome n'a aucune charge électrique.

Cette forme courante d'hydrogène, que l'on trouve en grande quantité dans la nature, s'appelle hydrogène 1, où le nombre 1 désigne la masse relative du noyau. L'hydrogène existe également dans la nature en petite quantité sous forme d'hydrogène 2, ou deutérium (figure 2.1). La masse du noyau de deutérium est deux fois plus grande que celle de l'hydrogène 1; le noyau de

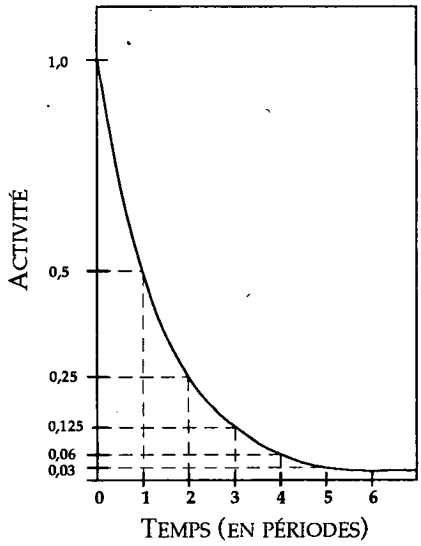
FIGURE 2.1
MODÈLE ATOMIQUE DE L'HYDROGÈNE



deutérium est constitué d'un proton et d'une particule neutre de même masse appelée *neutron*. Les propriétés chimiques d'un élément dépendent du nombre de protons dans le noyau et du nombre équivalent d'électrons en orbite autour du noyau; ainsi, le deutérium possède les mêmes propriétés chimiques que l'hydrogène 1. L'hydrogène 1 et le deutérium sont des atomes *stables* qui n'émettent aucun rayonnement.

Un troisième type d'hydrogène présent dans la nature en quantités encore plus petites que le deutérium est l'hydrogène 3, ou tritium. La masse du noyau de tritium est trois fois plus grande que celle de l'hydrogène 1; le noyau de tritium est constitué d'un proton et de deux neutrons. Ses propriétés chimiques sont elles aussi semblables à celles de l'hydrogène 1. Le nombre inégal de protons et de neutrons dans le noyau de tritium explique la tendance naturelle de ce dernier à réarranger sa structure; en fait, le noyau de tritium est *instable*. Un petit électron chargé négativement, appelé *particule bêta*, est émis spontanément par un des neutrons. Par conséquent, le neutron devient un proton et l'hydrogène 3 se transforme en un autre élément appelé hélium 3, qui est un atome stable.

FIGURE 2.2
COURBE DE DÉSINTÉGRATION



C'est l'un des exemples les plus simples de radioactivité naturelle. La tendance naturelle d'un atome radioactif, ou *radionucléide*, à se réarranger de lui-même dépend de sa nature et est mesurée par sa *période radioactive*. La période est l'intervalle de temps au bout duquel la moitié des atomes de l'élément se sont désintégrés en un autre type d'atomes, en émettant un rayonnement. Après une période, la moitié du radionucléide subsiste; après deux périodes, un quart; après trois périodes, un huitième, et ainsi de suite (figure 2.2). La période du tritium est d'environ 12 ans. Ainsi, le tritium formé il y a quelques siècles est disparu ou s'est désintégré depuis lors et ne se trouve plus maintenant qu'en quantités négligeables.

Il existe une concentration naturelle de tritium dans notre environnement. Ce tritium est formé dans la partie supérieure de l'atmosphère par l'action des *rayons cosmiques* en provenance de l'espace extra-atmosphérique. Ainsi, on dit du tritium naturel qu'il est un radionucléide d'*origine cosmique*. Le carbone 14 est également un radionucléide d'origine cosmique important.

Il y a environ cinq milliards d'années, certains radionucléides qui font aujourd'hui partie des substances terrestres étaient déjà présents, avant même que la Terre ne soit formée. Ces radionucléides sont dits *primitifs* et comprennent le potassium 40, le thorium 232 et l'uranium 238. Comme nous l'avons mentionné plus tôt, le nombre représente la masse du noyau. Cette masse dépend du nombre de protons ou de neutrons, chacun d'eux ayant une masse égale à 1 (ces unités s'appellent *unités de masse atomique*). Les périodes des trois radionucléides primitifs mentionnés plus tôt sont toutes très longues et se chiffrent en milliards d'années. Ainsi, ces radionucléides particuliers ne se sont pas désintégrés en quantités négligeables au cours des cinq derniers milliards d'années, ou environ, depuis la création de la Terre.

Les radionucléides artificiels, ou *anthropiques*, constituent un troisième type de radionucléides. Bien qu'un grand nombre de ces radionucléides, comme le strontium 90 et le plutonium 239, se forment naturellement sur la Terre, leurs concentrations dans la nature sont si peu élevées qu'ils sont pratiquement indétectables. La majeure partie du strontium 90 et du plutonium 239 que l'on peut détecter aujourd'hui à la surface de la Terre provient de sources artificielles, notamment des retombées radioactives suite aux essais d'armes nucléaires en surface effectués dans les années 50 et au début des années 60. Les essais d'armes ont également fait augmenter la concentration d'eau tritiée (eau dans laquelle une partie de l'hydrogène stable est remplacée par du tritium) dans notre environnement immédiat à environ cent fois son niveau naturel d'avant 1963; depuis ce temps, la désintégration radioactive normale du tritium et la dilution de l'eau tritiée, de l'atmosphère aux profonds océans, ramènent graduellement

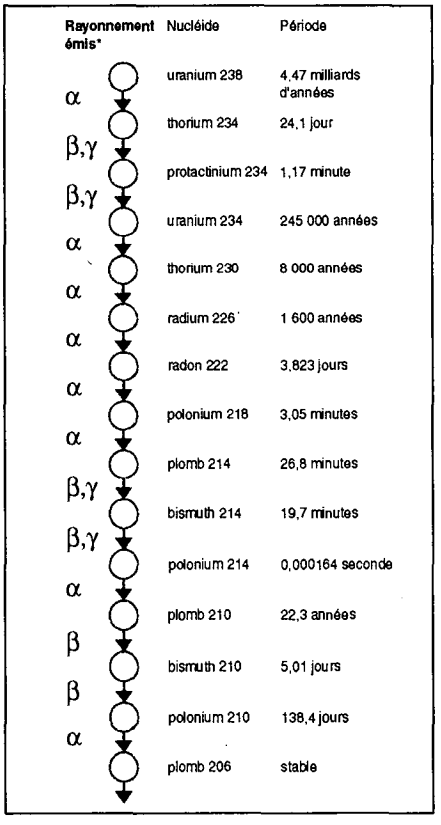
PÉRIODE DES ATOMES RADIOACTIFS		
Atome	**Période**	**Rayonnements émis***
Hydrogène 3	12,4 années	bêta
Carbone 14	5 730 années	bêta
Potassium 40	1,3 milliard d'années	bêta, gamma, X
Cobalt 60	5,3 années	bêta, gamma
Strontium 90	29,1 années	bêta
Iode 131	8 jours	bêta, gamma, X
Thorium 232	14 milliards d'années	alpha, gamma, X
Uranium 235	0,7 milliard d'années	alpha, gamma, X
Uranium 238	4,5 milliards d'années	alpha, bêta, gamma, X, neutrons
Plutonium 239	24 100 années	alpha, gamma, X

*Voir page 9 pour une description du rayonnement émis

la concentration de tritium dans l'eau douce à son niveau naturel. On produit également du tritium dans les centrales nucléaires; toutefois, seule une infime partie de ce tritium est libérée dans l'environnement. Les différentes sources de rayonnement, artificielles et naturelles, sont décrites plus en détail au chapitre 3.

Certains radionucléides, comme le tritium (hydrogène 3), le carbone 14 et le potassium 40 se désintègrent en une seule étape en un élément stable. D'autres radionucléides, comme le thorium 232 et l'uranium 238, forment un autre atome radioactif au cours de la première étape de leur désintégration normale. Les descendants, ou *produits de désintégration* du thorium 232, subissent au total neuf désintégrations radioactives avant de devenir des atomes stables, alors que les produits de désintégration de l'uranium 238 subissent treize transformations radioactives avant de devenir des atomes stables. Un grand nombre de radionucléides plus lourds, comme le thorium 232 et

FIGURE 2.3
CHAÎNE DE DÉSINTÉGRATION RADIOACTIVE



*Voir page 9 pour une description du rayonnement émis et le chapitre 15 pour les symboles.

l'uranium 238, sont ainsi à l'origine d'une chaîne de désintégration constituée d'une succession de radionucléides, chacun d'eux ayant sa propre période caractéristique (figure 2.3).

L'uranium 238 est particulier en ce sens qu'il peut également donner lieu, en de rares occasions, à une *fission* spontanée produisant deux atomes radioactifs plus petits, avec libération de neutrons (voir aussi le chapitre 10).

L'unité de mesure de l'intensité ou de l'activité d'une source radioactive est le *becquerel* (Bq). Dans une source dont l'activité ou l'intensité est de 1 Bq, un atome radioactif se désintègre chaque seconde. La concentration de radioactivité dans un gaz, dans un liquide ou dans un solide s'exprime couramment en becquerels par mètre cube, par litre et par kilogramme respectivement. Par exemple, la concentration de radon 222 dans l'air se situe habituellement aux environs de 30 Bq/m^3, la concentration de radium 226 dans l'eau potable municipale est d'environ 0,0003 Bq/L et la concentration de potassium 40 dans le sol est d'environ 400 Bq/kg.

QU'EST-CE QUE LE RAYONNEMENT IONISANT?

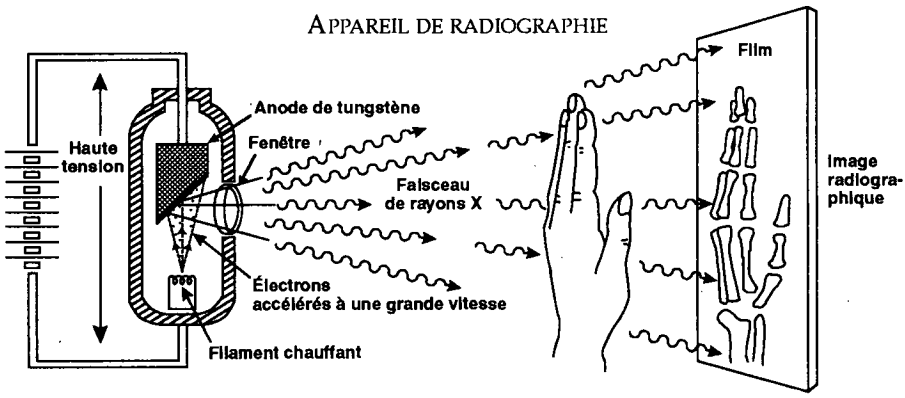
Les rayonnements ionisants se caractérisent par leur capacité de scinder les atomes neutres ou les combinaisons d'atomes (*molécules*) d'un gaz en particules chargées positivement et négativement appelées *ions*. L'ionisation sera abordée en détail plus loin dans le présent chapitre. C'est de cette propriété dont on s'est servi en 1925 pour élaborer la première méthode pratique pour mesurer l'intensité d'un champ de rayonnements ionisants.

Les rayons X sont généralement produits en accélérant un faisceau d'électrons dans un champ électrique de haute tension (environ 150 000 volts habituellement) dans le vide. Lorsque les électrons accélérés entrent en contact avec une cible solide, par exemple une plaque de tungstène, il y a émission de rayons X (figure 2.4).

Les rayons X provenant soit du Soleil et des autres étoiles, soit de la désintégration de certains radionucléides sur la Terre peuvent également être détectés

• Noyau de l'atome	Protons et neutrons	Charge positive
• Atome	Noyau et électrons orbitaux	Pas de charge nette
• Molécule	Combinaison d'atomes sans électrons orbitaux non appariés	Pas de charge nette
• Ion	Électron, atome ou molécule qui a perdu ou gagné un ou plusieurs électrons	Charge positive ou négative

FIGURE 2.4
APPAREIL DE RADIOGRAPHIE



au moyen d'instruments spéciaux; toutefois, l'intensité de ces sources de rayons X est extrêmement faible à la surface de la Terre. Les rayons X font partie du spectre électromagnétique. Comme ils possèdent une grande énergie comparativement à d'autres formes de rayonnement électromagnétique, ils peuvent entrer en collision avec les électrons des atomes de la substance qu'ils traversent et les en éjecter. L'électron éjecté et l'atome qui reste sont des ions et possèdent une charge électrique. Certains types de rayonnements électromagnétiques moins énergétiques, comme la lumière visible, ne sont pas capables de décomposer ou de briser les atomes de cette manière. Dans la présente publication, le terme *rayonnement* s'entend d'un rayonnement ionisant.

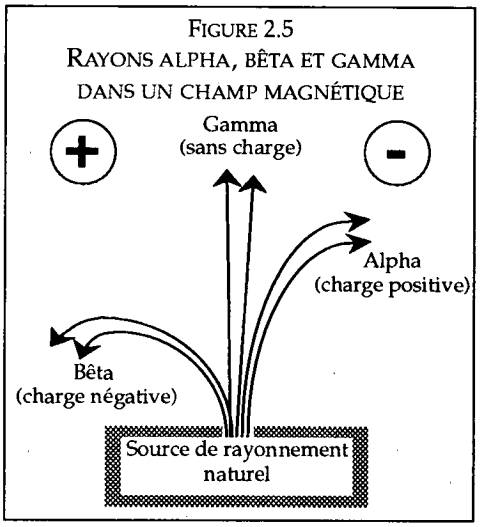
Toute particule subatomique qui se déplace à grande vitesse fait également partie de la catégorie des rayonnements ionisants. Les trois premiers types de rayonnements ionisants de sources naturelles à avoir été découverts ont été appelés *rayons alpha, bêta* et *gamma* selon la direction de leur trajectoire dans un champ magnétique puissant (figure 2.5). La trajectoire des rayons alpha, appelés généralement particules alpha aujourd'hui, était légèrement déviée d'un côté, ce qui indiquait qu'ils étaient porteurs d'une charge positive et qu'ils étaient plutôt lourds. Les rayons ou particules bêta étaient déviés fortement dans la direction opposée, ce qui indiquait qu'ils étaient porteurs d'une charge négative et qu'ils étaient beaucoup plus légers. On sait aujourd'hui que les rayons alpha sont des noyaux d'hélium chargés positivement (deux protons et deux neutrons) qui sont éjectés du noyau lourd de certains radionucléides comme le thorium 232 et l'uranium 238 au cours de certaines étapes du procédé naturel de désintégration. Les rayons bêta, ou particules bêta, sont des électrons rapides, chargés négativement, qui sont éjectés des

noyaux de tritium et d'un grand nombre d'autres radionucléides. Lors de la désintégration radioactive, une quantité appréciable d'énergie est habituellement libérée par le noyau. Cette énergie prend souvent la forme de rayons gamma. Les rayons gamma appartiennent au spectre électromagnétique et sont semblables aux rayons X. Leur trajectoire n'est pas déviée dans un champ magnétique.

Une grande diversité d'autres particules subatomiques ont été découvertes à ce jour. Parmi celles-ci, mentionnons le *positron* qui est une particule bêta de charge positive et non pas négative, et le *neutrino*, qui est neutre. Ces particules ne présentent pas d'intérêt particulier en radioprotection.

Dans la plupart des applications, la seule autre particule subatomique qui présente un certain intérêt en radioprotection est le neutron. Des neutrons libres à l'extérieur du noyau sont présents en petites quantités dans la nature et sont à l'origine d'une partie du rayonnement cosmique qui atteint la surface de la Terre en provenance de l'espace. Des flux denses de neutrons sont produits dans les réacteurs nucléaires. Une substance devient habituellement radioactive lorsqu'elle est bombardée par des neutrons; toutefois, cela ne se produit habituellement pas lorsqu'elle est bombardée par d'autres types de rayonnements, comme les rayons gamma.

FIGURE 2.5
RAYONS ALPHA, BÊTA ET GAMMA DANS UN CHAMP MAGNÉTIQUE

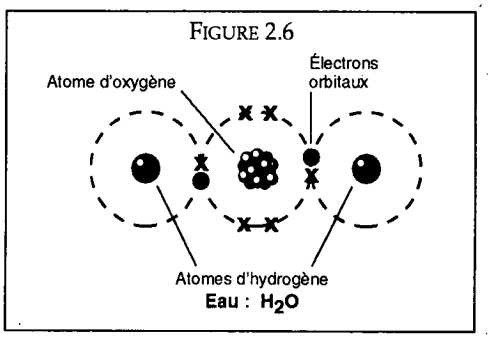


RÉACTION DES TISSUS AUX RAYONNEMENTS IONISANTS

Pour comprendre l'effet des rayonnements ionisants sur les tissus, il est nécessaire de connaître un peu la structure moléculaire de la matière.

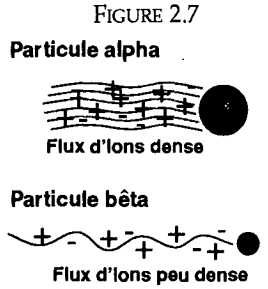
La matière est constituée de particules fondamentales, qui peuvent être des atomes ou des combinaisons d'atomes, appelées molécules. Ces combinaisons résultent de l'interaction des électrons orbitaux des atomes. Par exemple, la molécule d'eau est la combinaison d'un atome d'oxygène et de deux atomes d'hydrogène (figure 2.6).

FIGURE 2.6



Divers procédés permettent d'*ioniser* les atomes et les molécules. L'*ionisation* est un procédé qui consiste à séparer un électron orbital d'un atome ou d'une molécule pour donner naissance à une *paire d'ions*. La paire d'ions est constituée de l'électron isolé (qui peut rapidement se combiner à un autre atome pour former un ion négatif) et de l'atome résiduel, ou molécule, qui est maintenant chargé positivement. La production de paires d'ions est la principale façon de transmettre l'énergie du rayonnement ionisant à la substance à travers laquelle elle passe, comme un tissu. On dit de la substance ou du tissu qu'il a reçu une *dose* de rayonnement; cette dose se mesure dans sa forme la plus simple par l'énergie absorbée, en joules par kilogramme de tissu irradié (des unités de doses de rayonnement plus utiles en radioprotection sont traitées un peu plus loin dans la présente section). Les particules alpha et, dans une moindre mesure, les neutrons, sont très ionisants lorsqu'ils traversent une substance. Les rayons bêta et gamma sont beaucoup moins ionisants par unité de distance parcourue (figure 2.7).

FIGURE 2.7



Lorsque l'énergie d'un rayonnement est absorbée par un tissu (ou par une autre substance), il y a formation de certains produits chimiques très réactifs, connus sous le nom de radicaux libres. Ces produits peuvent entraîner des modifications chimiques potentiellement dommageables dans les matières organiques présentes dans les cellules des tissus.

RAYONNEMENT IONISANT DANS UN TISSU

Rayonnement
↓
Absorption d'énergie par le tissu
↓
Formation de radicaux libres
↓
Modifications chimiques
↓
Effets biologiques

La molécule organique d'un tissu qui présente le plus grand risque de dommages après exposition aux rayonnements ionisants est l'*acide désoxyribonucléique*, ou *ADN*. La molécule d'ADN est le support matériel de l'hérédité; dans l'espèce humaine, plus de 10 000 informations génétiques sont codées sur toute la longueur de la chaîne de l'ADN. La plupart des dommages chimiques causés à la structure de l'ADN, qu'ils se produisent spontanément ou à la suite d'une exposition à un rayonnement ou à d'autres agents, sont réparés activement par les cellules vivantes. L'information relative à cette réparation est elle-même codée dans l'ADN. Toutefois, une petite partie des dommages n'est pas réparée

correctement, et c'est ainsi que des modifications permanentes sont apportées à la structure de l'ADN. Certaines de ces modifications peuvent prendre la forme d'un effet biologique nuisible, comme dans le cas d'une tare transmise aux descendants ou d'un cancer. Les particules alpha causent un grand nombre de dommages rapprochés les uns des autres, de sorte que les erreurs de réparation sont plus probables que dans le cas des dommages causés par les rayons gamma, où les dommages sont plus dispersés.

Dans le cas de doses assez faibles pour permettre à la cellule irradiée de survivre, la proportion des modifications permanentes ayant des effets biologiques nuisibles est inférieure à 1 sur 10 000 modifications chimiques dans l'ADN.

Une caractéristique importante des différents rayonnements ionisants est leur profondeur de pénétration dans les tissus de l'organisme. Cette dernière dépend de l'énergie du rayonnement, de sa charge électrique et de sa masse. Les rayons X, les rayons gamma et les neutrons qui possèdent une énergie suffisante peuvent atteindre tous les tissus à partir d'une source externe. Par contre, les particules alpha sont arrêtées par une feuille de papier mince ou par les couches mortes superficielles de la peau. Par conséquent, les radionucléides qui émettent des particules alpha ne sont pas dangereux pour l'humain, à moins d'être absorbés par l'organisme. Cette situation peut se produire si le sujet a inhalé (en inspirant), ou ingéré (en mangeant ou en buvant) de telles substances, ou lorsqu'une blessure est contaminée. La profondeur à laquelle les particules bêta peuvent pénétrer dans les tissus dépend de leur énergie, qui est particulière au radionucléide duquel elles proviennent. Les particules bêta énergétiques peuvent pénétrer dans les tissus à une profondeur de plus ou moins un centimètre, bien que la majeure partie des particules soit absorbée dans les tout premiers millimètres. Par conséquent, les radionucléides qui émettent des particules bêta présentent un risque pour les tissus superficiels comme la peau et le cristallin de l'œil, lorsque les radionucléides se trouvent à l'extérieur du corps, mais ils ne présentent des risques pour les tissus internes que lorsqu'ils ont été absorbés à l'intérieur du corps.

DOSIMÉTRIE

Les rayonnements ionisants ne peuvent pas être détectés directement par les sens, mais on peut les détecter et les mesurer au moyen d'un grand nombre de méthodes physiques. Les méthodes de mesure se sont beaucoup améliorées. D'ailleurs, les unités de dosimétrie ont été modifiées à plusieurs reprises depuis qu'il a été rendu possible en 1925 de mesurer de faibles doses.

En radioprotection, il est essentiel que les unités utilisées pour mesurer les doses reflètent le dommage, ou les

lésions, que la dose reçue pourrait infliger au tissu ou aux organes. Trois facteurs importants déterminent l'ampleur des dommages causés par l'exposition à un rayonnement donné. Le premier est la quantité d'énergie communiquée au tissu ou aux organes. On appelle ce facteur la *dose absorbée*. L'unité de la dose absorbée est le *gray*, ou Gy. Un Gy est une dose absorbée d'un joule par kilogramme de substance irradiée. Une personne ayant reçu une dose au corps entier de 1 Gy a absorbé un joule d'énergie pour chaque kilogramme de tissu corporel.

Le dommage causé à un organe ou à un tissu particulier dépend non seulement de l'énergie absorbée, mais aussi du type de rayonnement qui transmet l'énergie. Par conséquent, la dose absorbée est multipliée par un *facteur de pondération du rayonnement* pour donner un *équivalent de dose* dans l'organe. Le facteur de pondération des rayons X, des rayons gamma et des rayons bêta est de 1, et celui des particules alpha et des neutrons rapides est de 20.

FACTEUR DE PONDÉRATION DES RAYONNEMENTS

Type de rayonnement	Facteur
X, bêta et gamma	1
Neutrons :	
0,01 à 0,1 MeV*	10
0,1 à 2 MeV	20
2 à 20 MeV	10
Particules alpha	20

*MeV signifie méga-électronvolt

L'équivalent de dose obtenu en multipliant la dose absorbée par le facteur de pondération du rayonnement s'exprime en unités appelées *sieverts*, dont l'abréviation est Sv. (Sievert et Gray sont les noms d'éminents scientifiques ayant contribué de façon importante à la radioprotection. Cela rappelle l'utilisation d'autres noms comme ceux de Watt, Joule et Newton.)

Des unités plus petites que le sievert sont couramment utilisées, comme le millisievert (mSv), qui représente un millième de sievert. L'équivalent de dose est un indicateur du risque qu'un dommage soit causé par l'exposition d'un organe ou d'un tissu particulier à divers rayonnements ionisants, peu importe leur type ou leur énergie; un équivalent de dose de 1 Sv de rayons alpha, par exemple, causera les mêmes dommages que 1 Sv de rayons X au poumon.

Toutefois, les conséquences nuisibles de l'exposition aux rayonnements varient de façon appréciable, en grandeur et en genre, d'un tissu ou organe corporel à un autre, pour le même équivalent de dose. Le risque de cancer fatal qui résulte d'un équivalent de dose de 1 Sv au poumon est supérieur au risque d'un cancer fatal résultant d'un équivalent de dose de 1 Sv à la thyroïde. Et la nature du dommage résultant d'un équivalent de dose de 1 Sv aux organes reproducteurs diffère du dommage résultant de la même dose reçue par la moelle osseuse rouge. Pour tenir compte des

différents effets nuisibles d'un même équivalent de dose, un ensemble de *facteurs de pondération des tissus* a été élaboré. Ces facteurs de pondération sont fondés sur les évaluations de la probabilité qu'un dommage soit causé au tissu, ainsi que sur la nature du dommage causé au tissu par un équivalent de dose donné. Les facteurs considérés sont la probabilité qu'il y ait cancer, la facilité relative avec laquelle la personne peut guérir de ce cancer, la probabilité que l'irradiation des organes reproducteurs résulte en perturbations génétiques graves chez les descendants de personnes irradiées, et les années d'espérance de vie normale perdues ou rendues considérablement invivables en raison de tous ces effets. Les facteurs de pondération des tissus adoptés par la Commission internationale de protection radiologique dans ses recommandations de 1990 figurent au tableau ci-contre.

On appelle *dose effective* la somme des produits des doses absorbées dans divers tissus irradiés par le facteur de pondération du rayonnement et par le facteur de pondération du tissu. L'unité de la dose effective est aussi le sievert (Sv). Dans les cas de faibles expositions, les dommages qui résultent d'une dose effective donnée devraient être sensiblement les mêmes, indépendamment du type de rayonnement ou des tissus irradiés. Ainsi, la gravité du dommage biologique résultant d'une dose effective de 1 Sv de rayons alpha au poumon devrait être à peu près la même que celle qui résulte d'une dose effective de 1 Sv de rayons X aux organes reproducteurs, ou de 1 Sv de rayons gamma à haute énergie ayant irradié uniformément le corps entier.

FACTEURS DE PONDÉRATION DES TISSUS

Tissu ou organe	Facteur
Organes reproducteurs	0,20
Moelle osseuse rouge	0,12
Côlon	0,12
Poumon	0,12
Estomac	0,12
Vessie	0,05
Sein	0,05
Foie	0,05
Oesophage	0,05
Thyroïde	0,05
Peau	0,01
Surface des os	0,01
Autres organes ou tissus	0,05
Corps entier	1,0

À titre d'exemple, si un homme reçoit une dose au corps entier de 100 mSv, un équivalent de dose de 500 mSv à la thyroïde et un équivalent de dose de 400 mSv aux poumons, alors la dose effective E qu'il a reçue est donnée par :

E = (1 x dose au corps entier) + (0,05 x dose à la thyroïde) + (0,12 x dose aux poumons)
= (1 x 100) + (0,05 x 500) + (0,12 x 400)
= 100 + 25 + 48
= 173 mSv

Il est souvent utile d'avoir une mesure de la dose totale de rayonnement pour un groupe de personnes ou une population entière. La grandeur utilisée pour exprimer cette somme est la *dose collective*. L'unité de la dose collective est le *sievert•personne* (Sv•personne). La dose collective est simplement la somme des doses effectives reçues par chaque personne appartenant à un groupe de personnes exposées. Par exemple, si dans un groupe de 100 travailleurs, 20 reçoivent chacun une dose de 1 mSv, 30 reçoivent une dose de 2 mSv et 50 reçoivent une dose de 3 mSv, alors la dose collective du groupe est donnée par l'équation suivante : Dose collective = (20 x 1) + (30 x 2) + (50 x 3) = 230 mSv•personnes. De même, si nous supposons que la dose individuelle moyenne provenant de sources radioactives naturelles au Canada est d'environ 2 mSv par année, et que la population est d'environ 27 millions de personnes, alors la dose collective provenant des sources naturelles de rayonnement est le produit de ces deux nombres, soit environ 54 000 Sv•personnes par année.

Une autre grandeur dosimétrique utile est la *dose engagée*. Des radionucléides dont la période est longue, qui sont présents dans le corps, peuvent rester dans certains tissus pendant un grand nombre de jours ou d'années. La dose engagée est la dose effective totale reçue d'une substance radioactive dans le corps, au cours des 50 années qui suivent l'absorption de cette substance dans le corps d'un travailleur sous rayonnements ou une autre personne adulte, ou au cours des 70 années qui suivent l'absorption de cette substance chez un enfant. Cette valeur varie grandement selon le métabolisme interne et le taux d'élimination de chaque radionucléide par le corps. Les doses engagées sont implicites dans les calculs de la dose effective. Il suffit de connaître les unités de doses effectives et les unités de doses collectives pour comprendre les sources naturelles et artificielles de rayonnement, ainsi que leurs effets biologiques. À moins d'indication contraire, l'utilisation du terme *dose* dans le présent document doit être interprété comme étant la dose effective.

HIÉRARCHIE DE LA DOSIMÉTRIE

Dose absorbée
(énergie de rayonnement absorbée par unité de masse du tissu)

↓

Équivalent de dose
(dose absorbée pondérée quant aux dommages causés par les différents types de rayonnements)

↓

Dose effective
(Équivalent de dose pondéré quant à la susceptibilité de différents tissus aux cancers ou aux maladies génétiques causés par des rayonnements)

↓

Dose collective
(somme des doses effectives reçues par toutes les personnes exposées dans la population)

CHAPITRE 3

LES SOURCES D'EXPOSITION AU RAYONNEMENT

L'EXPOSITION DU PUBLIC

Le public est exposé au rayonnement surtout du fait des sources naturelles. Au Canada, la dose moyenne totale attribuable aux sources naturelles est de 2 mSv par année environ. De ce total, chacune des trois sources suivantes produit grossièrement une exposition de un tiers de millisievert : le rayonnement cosmique de l'espace, le rayonnement gamma terrestre provenant du sol sous nos pieds, et le rayonnement de radionucléides naturels, comme le potassium 40, présents dans nos organismes. Le reste de l'exposition origine de l'inhalation de gaz de radon et de leurs produits de désintégration radioactifs de courte période présents dans l'air. Les gaz de radon, chimiquement inertes, sont formés dans la chaîne de désintégration de l'uranium et du thorium naturels. La majeure partie de l'exposition créée par cette source est attribuable aux produits de désintégration de courte période provenant de la chaîne de désintégration radioactive qui s'amorce avec le radon 222 de la chaîne de l'uranium et qui se termine par le plomb 210, sans toutefois inclure ce dernier. Le radon diffuse constamment hors du sol, partout, et s'accumule dans l'air des maisons. On ne connaît pas avec précision la dose résultant de l'inhalation des produits de désintégration du radon présents dans l'air, comme nous le verrons au chapitre 4.

EXPOSITION ANNUELLE MOYENNE AU RAYONNEMENT IONISANT DU GRAND PUBLIC AU CANADA

Sources	Dose mSv par année
NATURELLES	
Rayons cosmiques	0,3
Rayons gamma du sol	0,35
Sources internes	0,35
Inhalation de produits de désintégration du radon	1,0
Total (arrondi)	2,0
ARTIFICIELLES	
Diagnostics médicaux	0,6
Retombées d'essais d'armes nucléaires	< 0,01
Retombées de Tchernobyl	< 0,001
Centrales nucléaires	< 0,001
Autres sources diverses	0,02
Total (arrondi)	0,6

La principale source artificielle d'exposition au rayonnement du grand public est l'utilisation médicale des rayons X à des fins diagnostiques. Les doses résultantes varient considérablement d'une

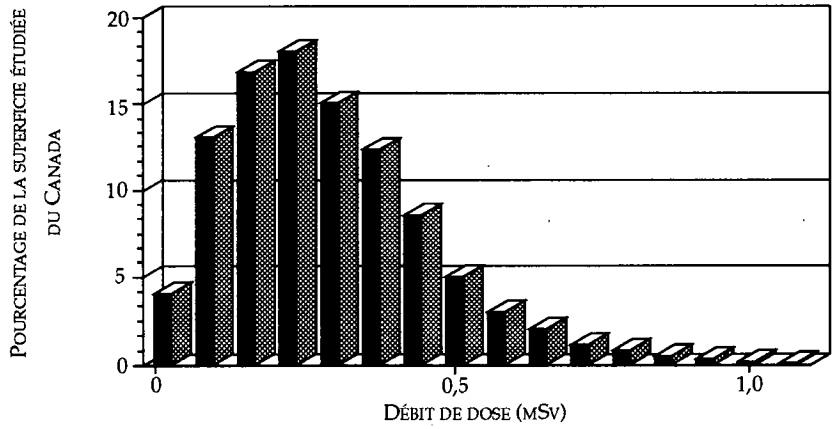
personne à l'autre. Il n'existe pas d'estimations fiables de la dose moyenne reçue des rayons X à des fins médicales au Canada. Sur la foi de certaines données canadiennes et d'études menées aux États-Unis et au Royaume-Uni, on estime qu'elle serait actuellement de 0,6 mSv environ par année.

Les autres sources artificielles augmentent de très peu ce total. Les doses annuelles attribuables aux retombées d'essais d'armes nucléaires ont atteint un maximum dans les années 50 et au début des années 60, mais elles sont de nos jours si faibles qu'on les considère négligeables en comparaison des doses attribuables aux sources naturelles. Les doses consécutives à la catastrophe de Tchernobyl survenue en 1986 ont atteint le maximum de 0,002 mSv environ au Canada dans l'année qui a suivi l'accident, et sont maintenant infimes. Les doses reçues au Canada par le grand public du fait de l'exploitation des centrales nucléaires sont également faibles. On estime en effet que la dose maximale reçue par une personne vivant près d'une centrale nucléaire est inférieure à 0,05 mSv par année, et que celle d'une personne vivant à distance des centrales est encore plus petite. La dose moyenne reçue par les personnes vivant en Ontario attribuable à l'exploitation des centrales nucléaires, qui fournissent actuellement à la province la moitié de l'électricité dont elle a besoin, est inférieure à 0,001 mSv par année, et elle est encore bien moindre pour l'ensemble des personnes vivant au Canada.

D'autres activités humaines accroissent légèrement notre exposition au rayonnement. Ainsi, le fait de passer 10 heures dans un avion commercial à l'altitude moyenne de 8 km augmente la dose provenant des rayons cosmiques de 0,02 mSv environ; la dose moyenne originant de cette source pour l'ensemble de la population canadienne est environ de 0,005 mSv par année. L'utilisation des engrais phosphatés, diverses activités minières, l'utilisation du charbon pour produire de l'électricité et le pompage d'eau de puits profonds (elle contient du radon) ont aussi pour effet d'augmenter notre exposition au rayonnement. L'exposition moyenne totale du grand public résultant de l'ensemble de ces sources diverses se situe probablement autour de 0,02 mSv par année.

Toutes les expositions dont il est question ci-dessus sont des expositions moyennes. Les doses de rayonnement reçues de sources naturelles varient considérablement d'une région à l'autre du Canada. Vivre à hautes altitudes augmente l'exposition au rayonnement cosmique. Ainsi, les populations des villes comme Bogota, Lhasa et Quito, toutes situées à une altitude de 3 km ou plus, reçoivent des doses de rayonnement cosmique de 1 mSv par année environ. Il n'existe par de grandes villes canadiennes à de telles altitudes. Les doses de rayonnement cosmique reçues dans les villes de l'Ouest canadien situées à environ 1 km d'altitude ne sont que de 0,4 mSv par année environ, comparativement à la valeur moyenne

FIGURE 3.1
DÉBITS DE DOSE DE RAYONNEMENT GAMMA PROVENANT DU SOL CANADIEN



de 0,3 mSv par année pour l'ensemble du Canada. Les variations attribuables à l'altitude sont beaucoup plus petites que les variations de l'exposition au rayonnement gamma provenant du sol, qui selon la région du pays, peut fluctuer d'un facteur dix ou plus (voir figure 3.1). Les valeurs indiquées dans cette figure sont les expositions mesurées à l'extérieur. Les expositions au rayonnement gamma peuvent être légèrement inférieures à l'intérieur dans les maisons à ossature de bois, et légèrement supérieures dans les sous-sols bétonnés et les maisons de maçonnerie.

EXPOSITIONS MOYENNES APPROXIMATIVES AUX PRODUITS DE DÉSINTÉGRATION DU RADON PRÉSENTS DANS L'AIR DES MAISONS DE SEPT VILLES CANADIENNES

Ville	mSv par année
Vancouver	0,2
Montréal	0,4
Toronto	0,55
Edmonton	0,8
Halifax	1,2
Regina	1,6
Winnipeg	2,2
Moyenne pour la population canadienne	0,8 environ

Il n'existe pas de méthode simple pour réduire l'exposition naturelle au rayonnement cosmique, au rayonnement gamma provenant du sol et au rayonnement produit par les radionucléides de l'organisme comme le potassium 40. Par contre, il est relativement aisé de réduire les fortes concentrations des produits de désintégration du radon pouvant être présents dans l'air de certaines maisons et de minimiser ces concentrations dans les maisons en construction. La concentration moyenne varie d'un facteur dix environ d'une ville du pays à l'autre, selon la nature du sol de la localité. D'une maison à l'autre, elle peut varier d'un facteur mille ou plus.

L'EXPOSITION PROFESSIONNELLE

L'exposition professionnelle est traitée en détail au chapitre 10. Les doses reçues par les travailleurs sont en général assez faibles, mais elles approchent à l'occasion la limite annuelle courante de 50 mSv par année, et la dépassent très rarement. En 1990, il y avait au Canada environ 111 000 travailleurs sous rayonnements; la dose moyenne reçue par eux a été de 0,5 mSv environ, ce qui donne une dose collective de 55,5 Sv•personnes. Une fois cette valeur répartie sur l'ensemble de la population canadienne, la contribution de l'exposition professionnelle n'est que de 0,002 mSv environ par rapport à la dose moyenne de 2,6 mSv au Canada.

CHAPITRE 4

LES EFFETS BIOLOGIQUES DU RAYONNEMENT

EFFETS PRÉCOCES D'UNE DOSE ÉLEVÉE

Une forte dose de rayonnement émise à grand débit, comme par exemple 5 Sv en quelques minutes, peut avoir divers effets chez l'être humain au bout de quelques mois, et notamment causer la mort. Une dose élevée reçue en une courte période tue un si grand nombre de cellules dans certains tissus que l'organisme est incapable de supporter la lésion qui s'ensuit. Les effets précoces ont ceci de caractéristique qu'il existe une *dose seuil* en deçà de laquelle ils ne s'observent pas. Ainsi, une dose inférieure à 1 Sv reçue en quelques minutes ne cause pas la mort précoce. Les limites de dose recommandées sur le plan international ont pour but précisément de prévenir tous ces effets précoces. Pour les personnes susceptibles d'être radioexposées au travail dans l'éventualité improbable d'une urgence nucléaire, la limite recommandée est une dose au corps entier de 0,5 Sv (ou de 5 Sv dans le cas d'une exposition cutanée à des rayons bêta) sur une courte période. On sait depuis nombre d'années qu'à débit élevé, une forte dose de rayonnement peut tuer les cellules vivantes : en fait, c'est cette propriété qu'on a exploitée en 1899 lorsqu'on a réussi à guérir un cancer de la peau et c'est encore elle qu'on met à profit de nos jours pour le traitement du cancer.

DOSE (Sv)	EFFET
0 - 0,25	Aucune lésion visible
0,25 - 1	Possibilité de nausées passagères, de stérilité temporaire chez les hommes et de changements temporaires dans les globules sanguins; aucune mort précoce.
1 - 3	Nausées, fatigue, vomissements, changements dans les globules sanguins, perte d'appétit, diarrhée; stérilité temporaire chez les hommes; mort possible.
3 - 6	Nausées, vomissements, diarrhée, changements marqués dans les globules sanguins, perte de poids, malaise généralisé; mort précoce de 50 % des sujets exposés; chez les survivants, stérilité permanente et apparition de cataractes.

EFFETS TARDIFS D'UNE FAIBLE DOSE

Une faible dose de rayonnement n'a pas de conséquence immédiate, mais

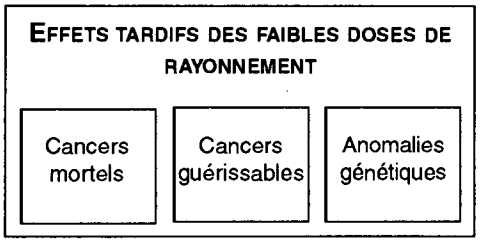
elle peut avoir des effets tardifs qui ne se manifesteront que de nombreuses années après l'exposition. Parmi les principaux effets possibles, signalons l'incidence accrue du cancer chez les sujets exposés et, chez leurs enfants, des anomalies génétiques. De tels effets tardifs sont dus à des lésions de l'ADN, comme nous l'avons déjà vu au chapitre 2.

Ce que nous savons des cancers radio-induits, nous l'avons appris en surveillant des groupes de personnes exposées il y a plusieurs années à des doses de rayonnement relativement élevées. Ce sont entre autres les travailleurs qui, autrefois, utilisaient de la peinture au radium pour peindre les cadrans fluorescents et qui ont accidentellement ingéré des quantités appréciables de radium pendant leur travail; des personnes souffrant d'une atteinte arthritique débilitante de la colonne vertébrale qui ont reçu des traitements aux rayons X à fortes doses; les travailleurs des mines d'uranium qui ont inhalé des produits de désintégration du radon présents à forte concentration dans l'air des mines à l'époque où les dangers de ce type de sources de rayonnement étaient mal connus; et les survivants japonais qui ont subi une exposition au corps entier à des rayons gamma à fortes doses, lors de l'attaque à la bombe atomique, en août 1945.

Les cancers radio-induits sont de mêmes types que les cancers d'origine naturelle. Toutefois, on peut estimer le risque d'une augmentation de l'incidence de cancers par unité de dose de rayonnement en suivant de près des groupes de personnes exposées par le passé à de fortes doses de rayonnement.

Les cancers ne sont pas tous mortels. L'issue est fatale dans environ 95 % des cancers du poumon, 50 % des cancers du sein, 10 % des cancers de la thyroïde et 0,2 % des cancers de la peau de tous genres. On estime que le tiers des cancers des organes internes causés par des rayonnements peuvent être guéris. Si l'on ajoute les cancers de la peau, la proportion de cancers qu'on peut guérir est beaucoup plus grande. En radioprotection, toutefois, on se préoccupe avant tout des cancers mortels. L'estimation des risques de cancers mortels permet aussi de comparer les risques liés aux rayonnements aux autres risques mortels auxquels une personne peut être exposée au cours de sa vie. Les comparaisons portant sur des effets non mortels présentent d'innombrables difficultés.

Il est impossible de déterminer le risque d'anomalies génétiques radio-induites par l'étude directe de populations humaines. Malgré des travaux poussés, aucune augmentation significative d'anomalies génétiques n'a été mise en évidence chez les enfants des survivants de la bombe atomique de Hiroshima et de Nagasaki, une constatation qu'aucune autre donnée fiable n'est venue infirmer.



ÉVALUATION QUANTITATIVE DES RISQUES DE CANCER

Des comités scientifiques internationaux ont été expressément chargés d'estimer la probabilité qu'une dose donnée de rayonnement provoque l'apparition d'un cancer chez les sujets exposés. Le *Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements* (UNSCEAR) a été créé en 1955 parce qu'on s'inquiétait des effets que pouvaient avoir sur la santé les retombées radioactives. Ce comité se réunit maintenant une fois par année, à Vienne; il regroupe de 70 à 100 scientifiques (physiciens, biologistes, généticiens, médecins et autres) de plus de 20 pays. Un haut fonctionnaire de Santé Canada dirige actuellement la délégation canadienne, avec le concours de conseillers scientifiques nommés par la Commission de contrôle de l'énergie atomique et d'autres organismes. À peu près tous les cinq ans, l'UNSCEAR produit un volumineux document sur les dernières publications scientifiques faisant état de la radioexposition des populations humaines et des effets biologiques des rayonnements.

La *Commission internationale de protection radiologique* (CIPR) a été créée en 1928 (elle portait un nom différent à l'époque); elle s'est d'abord occupée de la protection contre l'exposition indue aux rayons X d'usage médical et aux rayonnements du radium. Avec l'avènement de l'armement nucléaire, des réacteurs nucléaires et des accélérateurs à haute énergie, la commission a été réorganisée et, en 1950, on lui a donné le nom qu'elle porte encore aujourd'hui.

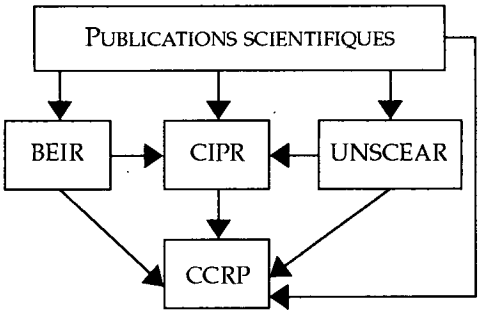
La commission principale se compose de 13 scientifiques, choisis pour leur connaissance approfondie des domaines qu'ils doivent traiter; ils viennent notamment d'Argentine, de Chine, d'Angleterre, de France, d'Allemagne, d'Italie, du Japon, de Pologne, de Russie et des États-Unis. La CIPR comprend en outre quatre comités permanents regroupant des scientifiques expérimentés dans différents champs spécialisés de la radioprotection. Elle constitue en outre des groupes de travail pour l'étude de certains dossiers et peut faire appel aux spécialistes de différents laboratoires du monde. Elle examine aussi la documentation scientifique consacrée aux effets biologiques des rayonnements et produit des rapports où elle formule des recommandations sur divers aspects de la radioprotection.

Les rapports du *comité* américain *d'étude des effets biologiques des rayonnements ionisants (Biological Effects of Ionizing Radiation* ou BEIR) représentent la troisième grande source de renseignements dans le domaine. Le comité BEIR

est chapeauté par la U. S. National Academy of Sciences et financé par l'Environmental Protection Agency. Son rapport le plus récent a été préparé par douze personnes provenant d'établissements universitaires et hospitaliers nord-américains et cinq scientifiques venus de laboratoires nationaux américains. Ce comité américain produit ses rapports indépendamment de l'UNSCEAR, dont souvent il se distingue également par l'approche qu'il applique dans l'analyse des données relatives aux effets des rayonnements sur la santé. Comme les rapports de l'UNSCEAR, les rapports du comité BEIR ne portent que sur l'évaluation des effets des rayonnements et ne comprennent aucune recommandation en matière de radioprotection.

Tous les pays industrialisés possèdent un comité national de radioprotection. Au Canada, c'est le *Comité consultatif de la radioprotection* (CCRP), qui relève directement du président de la Commission de contrôle de l'énergie atomique. Le CCRP examine les publications traitant des effets du rayonnement sur la santé, parraine avec d'autres organismes des colloques scientifiques publics portant sur des questions relatives à la radioprotection et formule des recommandations sur les limites de dose applicables au Canada. Actuellement, le CCRP est composé de spécialistes de la médecine et d'autres domaines qui viennent de diverses régions du Canada. Le comité national canadien, comme celui d'autres pays, s'inspire largement des recommandations de la CIPR.

CIRCULATION DE L'INFORMATION



Dans leurs dernières évaluations du nombre total de cancers mortels dus à une irradiation du corps entier, ces quatre comités ont utilisé les données recueillies sur les survivants japonais de la bombe atomique. Environ 42 000 personnes, de tous âges et des deux sexes, sont inscrites sur la liste des survivants de 1945 qui ont été exposés, sur une courte période, à des doses de rayonnement très variées. Il y a aussi un groupe témoin comprenant presque autant de personnes; celles-ci se trouvaient toutefois trop loin du centre de l'explosion pour avoir reçu une dose appréciable. Les données issues du suivi de ces personnes de 1950 à 1985 sont suffisantes pour être statistiquement fiables. Comme il n'est pas simple d'estimer les doses auxquelles les survivants ont été exposés, les chiffres sont revus à l'occasion. En 1986, une réévaluation conduite par une équipe internationale a permis de préciser la dose reçue par chacun des survivants de la bombe. Les caractéristiques des groupes étudiés sont résumées au tableau qui suit.

SURVIVANTS INSCRITS DE LA BOMBE ATOMIQUE
1950 - 1985

Groupe	Nombre
Personnes exposées (groupe exposé)	41 719
Personnes non exposées (groupe témoin)	34 272
Total (groupe exposé et groupe témoin)	75 991
Nombre total de décès dans les deux groupes 1950-1985	28 737
Nombre total de décès par cancer (groupe exposé)	3 435
Décès par cancer attribuable à la radioexposition en 1945 (groupe exposé)	340

Plus de 60 % des survivants inscrits vivaient encore à la fin de 1985. La dose reçue en 1945 par les personnes du groupe exposé va de 10 mSv à environ 5000 mSv. Dans ce groupe, environ 10 % du total des décès par cancer survenus jusqu'en 1985, soit environ 2 % de tous les décès dans le groupe, sont actuellement attribués aux rayonnements ionisants. Par ailleurs, aucune augmentation du nombre de décès dus à d'autres causes que le cancer n'a été observée chez les survivants exposés à une dose de moins de 2000 mSv en 1945; ces constatations corroborent des études indépendantes portant sur des animaux.

De nombreuses difficultés se posent lorsqu'il s'agit d'utiliser les données relatives à l'augmentation de cancers observés chez les survivants japonais de la bombe atomique pour évaluer la probabilité à vie de cancer pour une personne exposée à une dose *moindre*, émise à débit *moindre*.

La première est de savoir comment utiliser (extrapoler) les données sur le surcroît de cancers chez les survivants japonais au cours des 40 années qui ont suivi leur radioexposition pour prévoir l'augmentation à vie des cancers pour la population. On s'est servi à cette fin de divers modèles où l'augmentation du nombre de cancers est mise en relation avec la période de temps écoulée (âge) depuis l'exposition.

La deuxième est de savoir comment appliquer le risque à vie mesuré pour divers types de cancers dans une population japonaise à la population d'autres pays où l'incidence normale des cancers est différente. Les estimations produites en 1991 par la CIPR, censées être représentatives d'une population internationale, sont des valeurs moyennes obtenues en appliquant deux modèles d'extrapolation différents à la population de cinq pays.

La troisième difficulté consiste à extrapoler les données sur le surcroît de cancers observés chez les survivants japonais de la bombe atomique qui ont été exposés, dans l'espace d'une seconde environ, à diverses doses au corps entier de rayonnement gamma, pour déterminer les effets probables à faible débit de dose. Dans ses recommandations de 1991, la CIPR, qui avait pu consulter le rapport de 1988 de

l'UNSCEAR et celui de 1990 du comité BEIR, a décidé d'appliquer au débit de dose un facteur d'efficacité de 2. Ainsi, pour la production d'effets nocifs à long terme, l'efficacité d'une dose de rayonnement émise à faible débit correspond à peu près à la moitié de celle d'une dose égale émise à débit élevé.

PROBLÈMES DE L'ESTIMATION DES RISQUES DE CANCERS DUS À LA RADIOEXPOSITION DU CORPS ENTIER

- Extrapolation à partir de données limitées pour déterminer des risques à vie.
- Extrapolation de données applicables à des habitants du Japon pour déterminer des valeurs applicables à d'autres pays.
- Extrapolation à partir des effets observés à un débit de dose élevé pour déterminer les effets probables à un débit de dose faible.
- Impossibilité de prouver l'existence d'une relation linéaire pour les doses faibles.

Enfin, il faut voir dans quelle mesure les données peuvent être appliquées à des personnes exposées à de très faibles doses de rayonnement. Pendant de nombreuses années, la CIPR et d'autres comités scientifiques ont supposé que *toute* augmentation de l'exposition peut provoquer une hausse proportionnelle de cancers radio-induits. Cette hypothèse est impossible à vérifier; même chez les survivants japonais de la bombe atomique, on ne constate aucun surcroît significatif de cancers ,aux doses inférieures à 200 mSv, bien que les données soient compatibles avec une relation linéaire entre la dose et l'effet pour toutes les valeurs de dose. Au Canada, le CCRP estime raisonnable et prudent de supposer l'existence d'une telle relation linéaire entre la dose et l'effet, mais, constatant les difficultés de vérifier cette hypothèse, il recommande de parler de l'augmentation *possible* des cancers mortels à faible radioexposition.

Malgré ces problèmes et les incertitudes que comportent les diverses extrapolations mentionnées ci-dessus, il faut utiliser, pour les besoins de la radioprotection, la meilleure estimation possible de la probabilité de cancers radio-induits. En 1991, la CIPR a recommandé d'utiliser une valeur de quatre cancers mortels par 100 Sv•personnes pour les travailleurs et une valeur de cinq cancers mortels par 100 Sv•personnes pour la population en général, toutes classes d'âge confondues. Si l'on applique ces valeurs au Canada, la dose collective d'environ 50 000 Sv•personnes par an émise par les sources naturelles de rayonnement pourrait être la cause de 2500 cancers mortels par an, ce qui n'est qu'une petite fraction du nombre total de cancers mortels normalement recensés chaque année au Canada.

Aux risques de cancers radio-induits s'ajoutent les risques nominaux de préjudice global dû à l'ensemble des effets tardifs de l'exposition à de faibles doses de rayonnement. Ces risques se décomposent en quatre éléments : les cancers

mortels survenant dans des tissus différents; les cancers non mortels, ou guérissables, apparaissant dans les mêmes tissus; les anomalies génétiques graves touchant toutes les générations suivantes; les années d'espérance de vie normale perdues ou gravement compromises à cause de chacun de ces effets tardifs. Si l'on fait le calcul suivant les recommandations de la CIPR, les cancers mortels représentent environ 70 % du préjudice global. Au Canada, le CCRP recommande d'utiliser ces valeurs de préjudice global pour les besoins de la radioprotection.

Comme nous l'avons vu au chapitre 3, une partie considérable de l'exposition de la population aux rayonnements naturels est due à l'inhalation de produits de désintégration du radon présents dans l'air. Le risque de cancer du poumon lié à cette forme d'exposition a été évalué par la surveillance de mineurs autrefois exposés à des produits de désintégration du radon présents à forte concentration dans l'air des mines.

PRÉJUDICE PAR 100 SV•PERSONNES

Travailleurs (18 - 65 ans)	
Cancers mortels	4
Préjudice global*	5,6

POPULATION EN GÉNÉRAL (TOUS LES ÂGES)	
Cancers mortels	5
Préjudice global*	7,3

*Y compris les cancers mortels et non mortels et les effets génétiques graves.

Sur les huit grandes études publiées sur les mineurs, quatre ont trait à des exploitations minières du Canada. En général, les données relatives aux effets de l'exposition à des produits de désintégration du radon sont exprimées en *niveau opérationnel-mois* ou WLM (voir glossaire), une unité devenue désuète. Dernièrement au Canada, le CCRP, après examen des publications scientifiques consacrées à la question, a de nouveau confirmé que l'estimation du risque à vie de cancer du poumon après inhalation de produits de désintégration du radon se situait à environ 3 par 10 000 mineurs exposés à 1 WLM chacun. En 1990, la CIPR faisait état, dans ses recommandations, d'une plage de valeurs de 1 à 4 cancers du poumon mortels par 10 000 mineurs par WLM. Comme la plupart des mineurs suivis dans ces études fumaient la cigarette, il n'est pas simple d'extrapoler ces données pour déterminer les valeurs applicables aux non-fumeurs et aux enfants de la population en général. La conversion des valeurs d'exposition (en WLM) en valeurs de dose effective (en mSv) comporte également des éléments d'incertitude. Le CCRP propose un facteur de conversion d'environ 5 mSv par WLM, facteur utilisé dans le calcul des valeurs moyennes de l'exposition au radon naturel présentées au chapitre 3.

ÉVALUATION QUANTITATIVE DES RISQUES GÉNÉTIQUES

Les comités scientifiques responsables de l'évaluation des risques de cancer s'intéressent aussi à l'évaluation des risques génétiques. Ceux-ci sont plus difficiles à évaluer, car aucune augmentation notable des anomalies, qu'elles soient partiellement ou entièrement génétiques, n'a été observée dans les populations exposées qui ont été étudiées. Il a donc fallu s'y prendre autrement. L'une des approches consiste à mesurer l'incidence naturelle des anomalies génétiques chez les populations normales de divers pays, à estimer le taux naturel de mutations génétiques spontanées correspondant à cette incidence naturelle, puis à mesurer en laboratoire, chez des souris et d'autres animaux, le taux de mutation génétique lié à la radioexposition. Sur les deux premiers points, la contribution des scientifiques canadiens est considérable; quant aux taux de radiomutation chez la souris , ils ont été évalués aux États-Unis et en Angleterre.

DONNÉES NÉCESSAIRES POUR ESTIMER LES RISQUES GÉNÉTIQUES

- Incidence normale d'anomalies génétiques
- Taux de mutations génétiques naturelles
- Taux de mutations induites par Sv

Rappelons que certaines anomalies génétiques sont causées par des processus naturels et ne sont pas provoquées par des rayonnements. Ainsi, certaines maladies, comme le syndrome de Down, sont dues à la présence d'un nombre anormal de chromosomes dans l'œuf fécondé, et non à une mutation. Le syndrome de Down, appelé aussi trisomie 21, s'observe chez un enfant nouveau-né sur 1000 environ. Selon les généticiens qui ont participé à la préparation des derniers rapports du comité BEIR et de l'UNSCEAR, il est peu probable que les rayonnements causent le syndrome de Down ou d'autres troubles dûs à une anomalie du nombre de chromosomes dans l'œuf fécondé.

Il est bien connu des généticiens que les organismes présentant des mutations génétiques graves, qu'elles soient spontanées ou induites par un produit chimique toxique, un virus ou des rayonnements, sont moins aptes à se reproduire que les organismes ne présentant pas de telles mutations. Par conséquent, les anomalies génétiques graves ont tendance à disparaître après quelques générations dans les populations naturelles. Il en va de même chez l'être humain, plus particulièrement pour les anomalies se manifestant durant l'enfance, bien que le traitement de certaines d'entre elles ait fait de grands progrès. En somme, chez la descendance des personnes exposées aux rayonnements ou à d'autres agents, l'incidence des anomalies génétiques

graves devrait être maximale à la première génération, puis devrait graduellement diminuer au fil des générations suivantes. Les comités nationaux et internationaux qui examinent les données relatives aux effets génétiques fournissent des estimations, non seulement de la probabilité d'anomalies génétiques graves pour les enfants des personnes radioexposées, mais aussi de la probabilité cumulative pour toutes les générations subséquentes. C'est cette dernière valeur que la CIPR a utilisée en 1990 pour l'évaluation du risque de maladies génétiques graves chez la descendance des personnes radioexposées; ce risque est estimé à 2,5 par 100 Sv•personnes, quand l'exposition a lieu avant la reproduction.

FRÉQUENCE DES ANOMALIES GÉNÉTIQUES GRAVES PAR 100 SV•PERSONNES

Avant la reproduction (de 0 à 30 ans environ)	2,5
Moyenne chez les travailleurs (de 18 à 65 ans)	0,6
Moyenne pour la population en général (tous les âges)	1,0

L'irradiation des gamètes dans les organes reproducteurs (ovaires et testicules) ne peut être préjudiciable que lorsqu'elle se produit avant ou durant la période de reproduction. Par définition, pour les personnes qui n'auront pas d'enfants après une telle exposition, le risque génétique est nul. Dans un groupe donné, le nombre de personnes chez lesquelles la radioexposition des organes reproducteurs peut avoir une incidence génétique sera plus ou moins grande selon l'âge des sujets considérés. Si l'on suppose un âge moyen de 30 ans à la reproduction et une espérance de vie de 75 ans, on peut dire qu'en moyenne, le risque d'anomalie génétique grave résultant de la radioexposition de l'ensemble de la population représente une proportion de 30/75, ou de 40 %, du risque estimé pour des personnes plus jeunes, exposées avant la reproduction. Le tableau donne la moyenne, après correction, des coefficients de risque génétique après exposition pour le grand public et pour les travailleurs sous rayonnements. D'après une estimation fondée sur les meilleures données dont on dispose sur ce genre de risque, l'exposition des organes reproducteurs aux rayonnements de sources naturelles au Canada serait à l'origine de 0,3 % de l'incidence normale des anomalies génétiques graves.

Les risques dont nous venons de parler ont trait aux maladies transmises génétiquement aux enfants et à tous les autres descendants des personnes dont les organes reproducteurs ont été exposés aux rayonnements avant la reproduction. Il faut bien distinguer entre de tels effets génétiques et les effets tardifs qui peuvent résulter de l'exposition directe de l'enfant en développement dans le sein de sa mère.

EXPOSITION *IN UTERO*

L'enfant en développement dans le sein de sa mère serait particulièrement sensible aux fortes doses de rayonnement. Au Canada, dès 1945, cette sensibilité présumée amenait des restrictions dans l'emploi de femmes en âge de se reproduire dans les emplois sous rayonnements. Avec les nouvelles données scientifiques recueillies sur les effets des rayonnements chez l'embryon durant les premiers stades de la grossesse, ces restrictions ont été supprimées, d'abord en 1985 par l'organisme de réglementation au Canada, puis, en 1991, par la CIPR. On sait maintenant que les effets, s'il y en a, d'une faible dose de rayonnement sont probablement presque nuls pour l'embryon durant les quatre premières semaines suivant la conception, c'est-à-dire durant les six semaines suivant le début des dernières menstruations de la mère. Cependant, pour les femmes enceintes travaillant sous rayonnements, des restrictions spéciales s'appliquent encore une fois la grossesse déclarée à l'employeur.

Durant le développement embryonnaire, une forte dose de rayonnement à débit élevé peut avoir divers effets graves, y compris des anomalies congénitales et un retard mental profond chez les enfants nés vivants. Une faible dose de rayonnement, inférieure à 0,1 Sv, n'a toutefois aucun effet détectable de ce genre.

L'une des grandes préoccupations en radioprotection concerne le cancer radio-induit chez les enfants exposés *in utero* à de faibles doses de rayonnement. En effet, au Royaume-Uni et aux États-Unis, des études portant sur d'importants groupes d'enfants ont permis de constater des augmentations faibles, mais mesurables, de l'incidence des cancers apparaissant durant l'enfance chez des enfants dont la mère, pendant leur vie intra-utérine, avait été exposée dans la région abdominale à des rayons X d'usage diagnostique, dans les années 40 et 50. Par ailleurs, quelques données incomplètes dénotent une proportion excessive de cancers à l'âge adulte chez les sujets exposés *in utero* à de fortes doses de rayonnement à Hiroshima et Nagasaki. Dans ses recommandations de 1990, la CIPR a supposé que la probabilité totale de cancers mortels à l'âge adulte chez les personnes exposées aux rayonnements durant leur développement intra-utérin «est, au plus, de quelques fois supérieure à la probabilité pour l'ensemble de la population». En posant quelques hypothèses raisonnables, compatibles avec les données du rapport de la CIPR, et en tenant compte des effets génétiques pouvant résulter de l'exposition des organes reproducteurs de l'enfant, on estime que le préjudice total possible par Sv dû à une exposition *in utero* est probablement de trois à cinq fois supérieur à celui découlant de l'exposition de l'ensemble de la population. Une bonne partie de ce préjudice est due à des cancers de l'enfance entraînant une importante diminution de l'espérance de vie par cancer mortel.

Effet	Fréquence normale par 10 000 enfants nés vivants	Cas additionnels par 10 000 naissances après exposition *in utero* à 10 mSv
Avortement spontané	3000 - 5000 par 10 000 conceptions	aucun
Anomalies congénitales observables au cours des deux années suivant la naissance	600 - 800	aucun
Retard mental profond	environ 80	aucun
Cancers de l'enfance	20	5
Cancers mortels (à vie)	environ 2500	15
Tares héréditaires graves	environ 2500	2

PÉRIODE DE LATENCE DES EFFETS TARDIFS

Dans une population, la leucémie (sauf la leucémie lymphoïde chronique) commence à apparaître en surcroît de l'incidence normale environ deux ans après que la population en question a subi une exposition unique à une dose de rayonnement élevée; ces deux années représentent la période de latence minimale. Le nombre de cas de leucémie en excès est maximal environ huit ans après l'exposition, puis on observe une baisse graduelle, jusqu'à une valeur presque nulle environ 30 à 40 ans après l'exposition.

Chez les mineurs exposés à des produits de filiation du radon à forte concentration, l'incidence des cancers du poumon en excès semble évoluer de façon comparable à ce qu'on observe pour la leucémie. La période de latence minimale est d'environ cinq ans; le nombre de cancers en excès est maximal après 10 ou 15 ans environ, puis il diminue graduellement jusqu'à une valeur proche de zéro. Pour les cancers solides (c'est-à-dire autres que la leucémie), la période de latence minimale mesurée chez les survivants de Hiroshima et de Nagasaki est d'environ 10 ans. Chez ces personnes, le nombre total de cancers radio-induits de ce type observés jusqu'en 1985 est 3,3 fois plus élevé que le nombre total de leucémies radio-induites.

D'après les modèles d'évaluation du risque que la CIPR a utilisés pour formuler ses recommandations en 1990, le nombre maximal de cancers radio-induits apparaîtrait entre l'âge de 70 et 80 ans, lorsque l'incidence normale de cancers attribuables à d'autres causes est maximale. Par contre, la plupart des cancers de l'enfance qui pourraient être dus à une radioexposition *in utero* surviennent entre l'âge de 3 et 5 ans.

ÂGE MOYEN D'APPARITION DES EFFETS TARDIFS DES RAYONNEMENTS IONISANTS

Leucémie	de 8 à 10 ans après l'exposition
Cancers solides	70 ans
Cancers de l'enfance	de 3 à 5 ans
Effets génétiques	non détectables

Comme nous l'avons signalé auparavant, la fréquence des anomalies génétiques graves attribuables aux radioexpositions devrait être plus élevée chez les enfants des personnes exposées et diminuer graduellement au fil des générations suivantes. Il s'agit là d'une prévision théorique qu'il est impossible de confirmer, car les effets des rayonnements ionisants sont si faibles qu'on ne peut détecter aucun excès significatif d'anomalies génétiques chez l'être humain, que ce soit chez les enfants des survivants japonais de la bombe atomique ou chez les populations établies depuis de nombreuses générations dans des parties du monde où l'exposition aux rayonnements ionisants d'origine naturelle est plus élevée que la moyenne, comme c'est le cas dans certaines régions de la Chine.

CHAPITRE 5

LES PRINCIPES DE LA RADIOPROTECTION

PENSÉE DE BASE

En radioprotection, les approches sont remarquablement semblables d'un pays à l'autre. Cette homogénéité est due en grande partie à la Commission internationale de protection radiologique (CIPR). La CIPR est un organisme scientifique non gouvernemental qui publie depuis plus de 50 ans des recommandations touchant la protection contre les rayonnements ionisants. L'autorité dont elle jouit tient à la réputation des scientifiques qu'elle réunit et à la justesse des recommandations qu'elle formule. Les gouvernements de divers pays, dont le Canada, évaluent ces recommandations et les adaptent aux particularités de leur pays.

La radioprotection vise à protéger les personnes, leurs descendants et l'ensemble de l'humanité, tout en permettant des activités jugées nécessaires, mais susceptibles de donner lieu à la radioexposition de personnes. En 1977, la CIPR a énoncé deux grands buts de la radioprotection. Il s'agit, premièrement, de prévenir tout effet précoce pouvant résulter de l'exposition à une forte dose de rayonnement, et, deuxièmement, de réduire à des valeurs jugées acceptables par la société, la probabilité de cancers et d'anomalies génétiques graves radioinduits. L'actuel système de radioprotection est fondé sur trois grandes règles, lesquelles ont été définies par la CIPR et ont reçu, au Canada, l'appui sans réserve du Comité consultatif de la radioprotection (CCRP). Comme chacune de ces règles met en jeu des considérations de portée sociale, une grande prudence s'impose dans leur application.

LES TROIS GRANDES RÈGLES DE LA RADIOPROTECTION

JUSTIFICATION

Aucune pratique susceptible de donner lieu à la radioexposition de personnes ne doit être adoptée, à moins qu'elle ne présente suffisamment d'avantages pour en compenser les préjudices éventuels.

OPTIMISATION DE LA PROTECTION

Tous les risques d'exposition doivent être limités au niveau le plus faible qu'il soit raisonnablement possible d'atteindre (suivant le principe ALARA, ou *As*

Low As Reasonably Achievable) compte tenu des facteurs économiques et sociaux en jeu.

LIMITE DE DOSE INDIVIDUELLE

Pour toutes les pratiques visées par la radioprotection, l'exposition d'une personne doit être assujettie à une limite de dose réglementaire de sorte que nul ne coure de risques qui soient jugés inacceptables dans des circonstances normales.

JUSTIFICATION

Dans une société, la plupart des décisions de portée nationale concernant les activités humaines reposent implicitement sur la recherche de l'équilibre entre les coûts et les avantages. C'est là essentiellement le processus par lequel on détermine si une pratique donnée est valable ou non : c'est la «justification». Les effets des rayonnements font partie du coût de tout projet supposant une augmentation de la radioexposition. Le principe général de la justification prend toutefois en considération des aspects qui débordent le domaine de la radioprotection, ce qu'on peut montrer en prenant comme exemple le programme électronucléaire. L'un des aspects fondamentaux à considérer concerne les effets que peuvent avoir sur la santé l'énergie nucléaire et les autres types d'énergie. Divers centres de recherche du Canada et d'ailleurs ont affecté d'importantes ressources à l'estimation des risques que peut présenter pour la santé la production d'électricité par différentes méthodes. On met dans la balance les risques liés à chacune des étapes du cycle du combustible, soit :

- Extraction du minerai d'uranium ou du charbon, forage de puits de pétrole ou de gaz.
- Traitement et transport du combustible.
- Production d'électricité à partir du combustible.
- Évacuation des résidus de combustible usé.

DÉCÈS* LIÉS À L'EXPLOITATION D'UNE CENTRALE ÉLECTRIQUE DE 1 GIGAWATT PENDANT 1 AN

Type de centrale	Travailleurs	Grand public	Total
Charbon	1,6	4,5 - 7	6,1 - 8,6
Pétrole	0,22 - 0,53	0,3 - 30	0,5 - 30
Hydro-électricité	0,33 - 0,9	0,005 - 0,012	0,33 - 0,91
Nucléaire	0,2 - 0,23	0,02 - 0,12	0,22 - 0,35
Gaz naturel	0,13 - 0,3	0,006 - 0,35	0,14 - 0,65

* Valeurs estimées par le Comité consultatif de la sûreté nucléaire ou tirées de documents de référence présentés dans le rapport du Comité en 1987.

On calcule le risque total pour la santé des travailleurs et du grand public par unité d'électricité produite. Les évaluations ont surtout porté sur les effets qui, selon les prévisions, devraient survenir dans les 50 à 100 prochaines années à cause des activités actuelles. Au Canada, le Comité consultatif de la sûreté nucléaire a récemment examiné ces études et conclu, à la lumière des données qu'on y présente et d'informations tirées d'autres sources, que pour la production d'électricité, le charbon est le combustible le plus dangereux pour la santé; viennent ensuite, dans l'ordre, le pétrole, la fission nucléaire et le gaz naturel. On a fait des calculs préliminaires sur les dangers pour la santé associés à la production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables. D'après les résultats, les sources renouvelables comme l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne et l'énergie solaire sont, dans une certaine mesure, plus dangereuses que les centrales nucléaires, lorsqu'on prend en compte les accidents survenant durant la fabrication, la construction et l'entretien des installations nécessaires à l'utilisation de ces sources énergétiques. Signalons toutefois qu'en moyenne, les différences totales ne représentent qu'un facteur multiplicatif de 10 à 20.

Dans notre société, les organismes de réglementation et les autres organisations gouvernementales concernées considèrent justifié d'utiliser ces sources, à la condition que les risques d'exposition aux rayonnements ionisants ou à des substances toxiques et les risques de blessures restent faibles. Il faut aussi tenir compte de facteurs stratégiques et économiques comme la diversité, la sécurité, le coût, l'accessibilité et l'abondance des divers combustibles. Les coûts de construction et d'exploitation des divers types de centrales, la demande d'électricité à satisfaire, les besoins en énergie d'appoint et les incidences environnementales doivent entrer aussi en considération dans le choix de la source d'énergie à exploiter. Bref, les effets des rayonnements ionisants ne sont qu'un des éléments qui sont pesés dans le processus complexe qui mène à la décision finale.

JUSTIFICATION DU CHOIX D'UNE SOURCE D'ÉLECTRICITÉ

- Avantages pour la santé comparés aux effets nocifs.
- Coûts relatifs.
- Abondance du combustible.
- Incidences environnementales.

Un grand nombre d'activités humaines ayant des effets sur la santé et sur le bien-être des personnes font l'objet d'une réglementation et d'une surveillance exercées dans le cadre d'un processus international permanent. Ce processus, qui au cours du siècle dernier a permis d'accroître l'espérance de vie de 30 à 40 années dans les pays industrialisés, continue de prolonger notre espérance de vie moyenne. Depuis 1965, le taux moyen

d'accroissement de l'espérance de vie au Canada est d'environ 65 jours par année. Or, même si nous faisons de notre mieux pour économiser l'énergie, on peut s'attendre que la demande mondiale d'électricité continuera d'augmenter. Cette demande est étroitement liée à la prospérité de l'industrie dans différentes parties du monde. Ainsi, les effets positifs qu'ont les sources d'énergie sûres et bon marché sur notre espérance de vie et sur notre prospérité sont un facteur majeur à considérer dans le processus de justification.

OPTIMISATION

Lorsqu'une pratique a été choisie et justifiée, il faut en ajuster la conduite de façon à ce qu'elle apporte le maximum d'avantages à chaque individu ainsi qu'à la société dans son ensemble. Fondamentalement, la CIPR recommande la conduite qui permettra de maintenir toutes les formes de radioexposition au niveau ALARA (le plus faible qu'il soit raisonnablement possible d'atteindre), compte tenu des facteurs économiques et sociaux en jeu. Ce principe ALARA est solidement établi depuis de nombreuses années en radioprotection et est actuellement en voie de s'imposer dans d'autres domaines de la protection de la santé publique.

En 1954, la CIPR précisait dans ses recommandations qu'aucune augmentation de dose de rayonnement ne pouvait être considérée absolument sans danger. Cette hypothèse raisonnable, mais impossible à vérifier, a donné lieu à l'emploi d'expressions telles que «rayonnements mortels» dans la presse populaire et fait redouter à certains toute augmentation de l'exposition aux rayonnements ou à d'autres agents cancérogènes produits artificiellement. Ces craintes, naturelles et humaines, tiennent en général à une mauvaise compréhension des incidences qu'ont sur notre santé diverses activités humaines. En 1989, la CIPR a publié des lignes directrices de base sur l'optimisation, dont certaines sont pertinentes ici. Selon la CIPR, il est impossible de réduire la radioexposition résultant d'activités humaines au point qu'il n'y ait aucune augmentation par rapport à l'exposition au rayonnement naturel, à moins de renoncer à tous les avantages que procurent les activités en question. En général, il faut voir combien de ressources sont affectées à la réduction de la radioexposition par comparaison à celles qui sont consacrées à combler les autres besoins de la société. Dans l'ensemble, l'objectif est la répartition optimale des ressources consacrées à la sécurité et à la protection. Il est indubitable qu'une bonne pratique doit, dans les aspects qui touchent généralement la santé et la sécurité, viser le même objectif d'ensemble.

POUR QUE LES DOSES RESTENT FAIBLES

- Installations bien conçues.
- Formation du personnel exploitant.
- Jugement professionnel et consultation.
- Analyse coûts-avantages.

Par le passé, pour maintenir les doses de rayonnement au niveau ALARA, on a veillé à la conception des installations et à la formation du personnel exploitant et compté sur le jugement professionnel et le bon sens de ceux qui pouvaient évaluer la situation au jour le jour. Ces moyens ont donné d'excellents résultats.

Aujourd'hui, les techniques quantitatives telles que l'analyse coûts-avantages font de plus en plus partie de l'évaluation. Suivant cette méthode, on décide combien d'argent il faut affecter à la réduction de la radioexposition. La société ne dispose que de ressources limitées pour réduire les risques de radioexposition ainsi que les risques de maladie ou de mort prématurée liés aux autres causes. En définitive, c'est le produit intérieur brut par personne qui impose une limite sur le plan financier. De l'avis de chercheurs, pour sauver une vie ou prévenir une blessure grave, il semble acceptable que la société débourse de 50 000 $ à 200 000 $. Un débours de beaucoup supérieur ne se traduit par aucun avantage véritable pour la société, car des vies qu'on aurait pu sauver ailleurs sont alors perdues. Ainsi, le coût financier de l'amélioration de la radioprotection doit être évalué en fonction des autres aspects de la sécurité publique. On pourrait faire valoir, par exemple, qu'il serait plus profitable d'utiliser les fonds disponibles pour améliorer les soins médicaux ou la sûreté des routes, ou encore pour réduire les dangers autres que ceux liés à la radioexposition dans une centrale nucléaire.

En radioprotection, on se préoccupe avant tout de maintenir toutes les formes de radioexposition au niveau ALARA, compte tenu des facteurs économiques et sociaux en jeu. Vu l'importance accordée à cet objectif, la radioexposition aux rayonnements de sources artificielles est restée très faible, tant pour les travailleurs que pour le grand public.

Limite de dose individuelle

Selon les recommandations de la CIPR, des limites aux doses individuelles doivent être appliquées également. On veut ainsi faire en sorte que personne dans la société ne court de risque inacceptable en raison d'activités entraînant une augmentation de la radioexposition. La notion de risque acceptable a reçu une attention considérable.

Au Canada, les limites de dose réglementaires sont fixées en fonction des recommandations que la CIPR formule depuis les années 50. Ainsi, les valeurs récemment proposées par le gouvernement fédéral ont été établies d'après les dernières recommandations de la CIPR (1990).

Limites de dose actuelles et proposées* au Canada (mSv)

Groupe visé	Limites actuelles		Limites proposées	
	Par année	Tous les 3 mois	Tous les 5 ans	Par année
Travailleurs	50	30	100	50
Public	5	-	-	1

* D'autres limites s'appliquent à certains organes et tissus

Il est utopique de vouloir un monde sans risque. Toute activité (ou absence d'activité) humaine comporte une part de risque, laquelle est faible dans bien des cas. Il semble que nous soyons prêts à accepter des risques en contrepartie des avantages que procure la société moderne, dans la mesure où ces risques ne sont pas excessifs ou qu'il est facile de les éviter. D'après des études sur la psychologie humaine, un risque annuel permanent d'une mort sur 100 due à des dangers mortels au travail serait nettement inacceptable dans une société moderne. Par contre, une probabilité annuelle de 1 sur 1000 pourrait être acceptable si les travailleurs concernés sont au courant de la situation, s'ils estiment que certains avantages compensent jusqu'à un certain point ce risque et s'ils sont convaincus que, pour réduire ce risque, tout ce qui pouvait raisonnablement être fait a été fait.

Pour déterminer les limites de dose qu'elle a recommandées en 1977 et 1990, la CIPR a supposé qu'une probabilité annuelle d'une mort sur 1000 due à la radioexposition au travail est à la limite de l'acceptable. À l'évidence, certains métiers au Canada, dont la pêche et la chasse commerciales, présentent des risques mortels de plus de 1 sur 1000 par année.

La plupart des cancers mortels radioinduits surviennent à une époque tardive de la vie, alors que la moyenne d'âge des personnes tuées dans un accident de travail classique est inférieure à 40 ans. La perte d'espérance de vie est plus grande pour les accidents de travail classiques que pour les effets mortels radio-induits. Si l'on suppose une exposition permanente de 18 à 65 ans à un niveau de risque donné, la perte moyenne d'espérance de vie par suite d'un accident mortel est d'environ 34 ans et, par suite d'un cancer radioinduit, d'environ 13 ans. Évidemment, les risques de radioexposition professionnelle s'ajoutent aux risques d'accidents de travail classiques. Le surcroît de risque est encore plus important dans les mines d'uranium, où déjà, comme dans tous les autres types d'exploitations minières, les accidents sont fréquents. Par ailleurs, aucun accident mortel n'est survenu dans les centrales nucléaires en exploitation au Canada. On peut donc dire qu'il est relativement peu dangereux de travailler dans ces établissements, même s'il y a un risque de radioexposition. Si l'on examine les diverses étapes de la production et de la distribution de l'électricité, en excluant l'extraction des combustibles, on constate que le risque professionnel le plus élevé est lié au transport et à la distribution de l'électricité. En fait, bien que les installateurs de lignes électriques risquent des chutes et l'électrocution, aucune restriction ne limite le risque professionnel lié à leur métier. Quoi qu'il en soit, les sociétés modernes ne cessent de chercher des moyens de réduire tous les types de risques professionnels.

RISQUE ANNUEL MOYEN DE MORT DUE À UN ACCIDENT DE TRAVAIL ET À LA RADIOEXPOSITION AU CANADA	
DOMAINE DE TRAVAIL	**RISQUE DE MORT PAR ANNÉE**
Finances	1 sur 60 000
Services	1 sur 40 000
Commerce	1 sur 20 000
2 mSv de rayonnement par année	1 sur 12 000
Gouvernement (y compris policiers et pompiers)	1 sur 11 000
Secteur manufacturier	1 sur 11 000
Transports	1 sur 4000
Construction	1 sur 3000
20 mSv de rayonnement par année	1 sur 1200
Mines	1 sur 1100
Foresterie	1 sur 900
Pêche et chasse	1 sur 500

Note : Comprend les décès dus aux maladies professionnelles, sauf chez les travailleurs sans régime d'indemnisation des accidents de travail (20 % de tous les travailleurs). Chiffres établis d'après les données de la Direction générale de la santé et de la sécurité au travail de Développement des Ressources humaines Canada.

Pour le grand public, l'acceptabilité des risques auxquels une personne est involontairement exposée n'est pas une question si facilement résolue; le débat se poursuit toujours. La CIPR a recommandé une limite de dose de 1 mSv par an pour le grand public. Au Canada, la Commission de contrôle de l'énergie atomique a fait connaître, avec l'appui du CCRP, son intention d'adopter cette limite. Les doses de rayonnement réellement reçues importent plus, toutefois, que la limite légale. Au Canada, les établissements de services publics d'électricité ont établi des objectifs de construction et d'exploitation en fonction de la dose de rayonnement maximale à laquelle le grand public pourrait être exposé en raison de l'exploitation des centrales nucléaires. On vise ainsi à ce que la dose annuelle d'un membre du public soit inférieure à 0,05 mSv par an. En réalité, les doses effectives sont inférieures à cette valeur et sont en fait si faibles que les risques restent nettement dans les normes acceptables pour le grand public.

La population peut aussi être exposée aux rayonnements émis par les déchets du cycle du combustible nucléaire. Suivant la réglementation de la Commission de contrôle de l'énergie atomique concernant l'évacuation des déchets radioactifs au Canada, la dose de rayonnement maximale pour tout membre du public doit être inférieure à 0,05 mSv par an.

RISQUE ANNUEL MOYEN DE MORT DUE À UN ACCIDENT OU À LA RADIOEXPOSITION AU CANADA

DANGER	Risque de mort par année
Accident de la route	1 sur 5 000
Accident à la maison	1 sur 11 000
Accident de travail	1 sur 24 000
Limite légale de 1 mSv par an	1 sur 20 000
Maximum de 0,05 mSv par an attribuable aux centrales nucléaires	1 sur 400 000
Moyenne de 0,001 mSv par an attribuable aux centrales nucléaires	1 sur 20 000 000

Comme on peut le voir au tableau présenté ci-dessus, les dangers que peut présenter une telle dose pour la santé sont très faibles.

L'application des limites de dose comporte des exceptions importantes. En effet, les limites ne s'appliquent pas dans les circonstances suivantes :

- Radioexposition à des fins de diagnostic ou de traitement médical.
- Radioexposition de personnes procédant à des interventions vitales en situation d'urgence.
- Radioexposition du grand public due aux rayonnements de sources naturelles.

La plupart des procédures diagnostiques médicales nécessitant une radioexposition présentent des avantages pour la personne concernée qui dépassent de beaucoup le risque associé à l'exposition aux rayonnements. On a évalué certains cas, notamment celui du dépistage du cancer du sein par radiographie : les médecins ont conclu que cette procédure est justifiée pour les femmes de plus de 50 ans. Par ailleurs, ils ont réussi à réduire dans une mesure notable la dose de rayonnement reçue en raison de diagnostics médicaux et considèrent maintenant cette réduction comme une bonne pratique normale.

Tous les Canadiens sont exposés à des rayonnements naturels. Le niveau de ces rayonnements est si faible qu'une réduction des risques qu'il présente ne pourrait qu'être mineure. Prescrire des limites pour ce type d'exposition aurait pour effet de restreindre la liberté individuelle et se traduirait par un énorme gaspillage de temps et d'argent pour mesurer les doses afin d'établir la conformité aux valeurs prescrites.

RADIOPROTECTION DES AUTRES ORGANISMES VIVANTS

Selon la CIPR, si les êtres humains sont suffisamment protégés des rayonnements, la radioexposition des autres espèces vivantes devrait aussi être suffisante. Des études poussées ont été réalisées sur toute une variété d'organismes vivants chez lesquels on a observé les effets d'une forte dose de rayonnement émise à grand débit. Ces travaux ont révélé qu'en général, les mammifères, dont l'être humain, sont les êtres vivants les plus radiosensibles. La plage des doses létales pour différentes espèces vivantes atteint une valeur environ 3000 fois supérieure à celle qu'on a déterminée pour l'être humain. Les valeurs élevées ont été mesurées pour certaines bactéries et certaines plantes primitives.

Par ailleurs, au Canada et aux États-Unis, des travaux poussés réalisés sur le terrain ont été consacrés à des plantes laissées dans leur milieu naturel, chez lesquelles on a observé les effets de l'exposition chronique aux rayons gamma à divers débits de dose. Ces études ont permis de confirmer qu'à faible débit de dose, les rayons gamma sont moins nocifs qu'à débit de dose élevée. Même les plantes les plus vulnérables en milieu naturel ne présentent aucune lésion détectable à un débit de dose jusqu'à 1000 fois supérieur à celui des sources naturelles de rayonnement auxquelles ces plantes sont normalement exposées. Il est donc certain que de petites augmentations de la radioexposition normale ne compromettent nullement la survie de ces espèces.

CHAPITRE 6

LE RAYONNEMENT NATUREL

Le rayonnement et la radioactivité sont présents dans l'environnement terrestre depuis le début des temps géologiques. Un rayonnement ionisant est émis par la Terre elle-même et par des sources situées au-delà de la Terre. Dans ce dernier cas, le rayonnement provient du Soleil et de l'espace et est appelé rayonnement cosmique. Le rayonnement provenant de l'espace ne varie pas beaucoup avec le temps, mais celui qu'émet le Soleil varie en intensité quand il se produit des éruptions solaires. L'interaction du rayonnement cosmique avec des éléments contenus dans l'atmosphère produit des radionucléides comme le tritium et le carbone 14. Ces radionucléides sont dits d'origine cosmique. Le rayonnement provenant de la Terre elle-même est émis par des radionucléides d'origine naturelle contenus dans les roches à la surface de la Terre. Ces radionucléides sont dits primitifs car ils étaient présents lorsque la Terre s'est formée. L'uranium, le thorium et le potassium sont des radionucléides primitifs. Le rayonnement émis par ces radionucléides est appelé rayonnement primitif (figure 6.1).

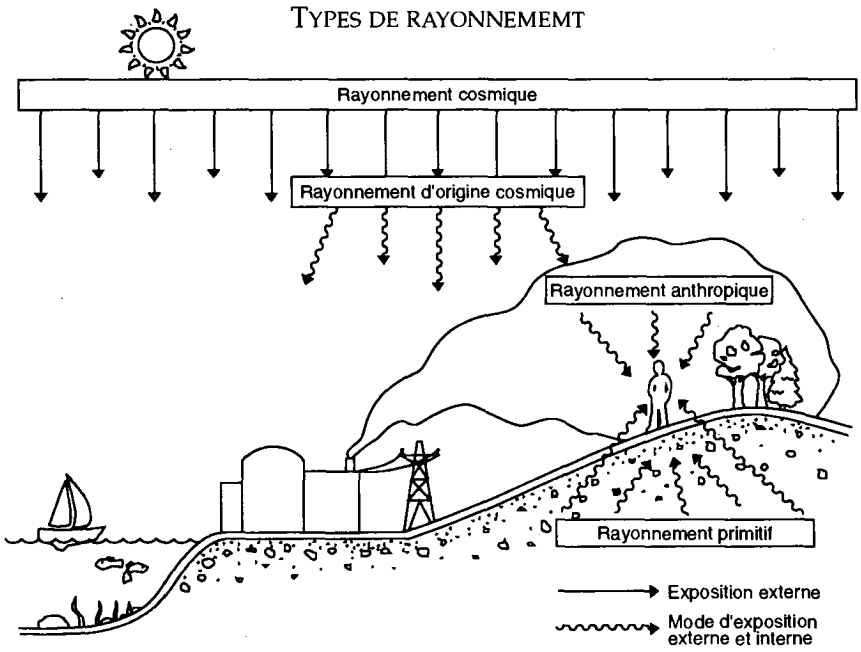
RAYONNEMENT COSMIQUE

Les rayons cosmiques sont infléchis par le champ magnétique terrestre, si bien qu'ils sont plus concentrés vers les pôles que vers l'équateur. Ils sont également absorbés par l'atmosphère, de telle sorte que leur intensité augmente avec l'altitude au-dessus du niveau de la mer; grosso modo, l'intensité double chaque fois que l'altitude augmente de 1800 m. Les immeubles absorbent également le rayonnement cosmique, de telle sorte que l'intensité est plus faible à l'intérieur qu'à l'extérieur. Au niveau de la mer, aux latitudes moyennes, la dose annuelle attribuable au rayonnement cosmique est d'environ 0,3 mSv.

RADIONUCLÉIDES D'ORIGINE COSMIQUE

Un grand nombre de nucléides sont produits par les rayons cosmiques, mais il y en a seulement quatre, le carbone 14, le béryllium 7, le sodium 22 et le tritium (hydrogène 3), qui contribuent de façon importante à la dose de rayonnement reçue par les êtres humains. La dose annuelle attribuable à l'ingestion de ces radionucléides et à l'irradiation interne

Figure 6.1
TYPES DE RAYONNEMEMT



subséquente des organes et des tissus s'élève à environ 0,015 mSv. La contribution du carbone 14 représente 80 % de ce total.

RADIONUCLÉIDES PRIMITIFS

Les roches, les sols et toutes les substances qui entrent en contact avec eux, comme les légumes et l'eau, renferment du potassium 40, de l'uranium et du thorium. Tous sont radioactifs. L'uranium et le thorium ont de nombreux produits de désintégration qui sont également radioactifs. Le potassium 40 se retrouve mélangé avec du potassium non radioactif stable, à une concentration d'environ 120 parties par million (ppm), c'est-à-dire que dans chaque million d'atomes de potassium naturel, il y a 120 atomes de potassium 40 radioactifs. Les autres sont stables.

La concentration moyenne d'uranium dans les roches et les sols est de quelques parties par million, mais, dans certains endroits, elle peut être beaucoup plus élevée. Lorsque la concentration dans un minerai dépasse 1000 ppm, l'exploitation minière de ce minerai peut être rentable. Les concentrations ont tendance à être plus élevées dans les roches ignées que dans les roches sédimentaires, et c'est à la limite méridionale du Bouclier canadien qu'elles sont les plus élevées. Le thorium est aussi largement répandu, bien que de façon inégale. L'uranium et le thorium sont tous les deux à l'origine de longues chaînes d'isotopes radioactifs

qui se terminent par des isotopes du plomb non radioactifs stables. Deux gaz particulièrement importants, le radon et le thoron, se retrouvent dans les deux séries de produits de désintégration. Ces deux gaz seront examinés plus en détail ci-dessous.

Les radionucléides primitifs sont source d'exposition externe et interne lorsqu'ils sont ingérés ou inhalés et subséquemment déposés dans le corps. L'exposition au rayonnement externe ne se produit pas seulement à l'extérieur. Elle peut également se produire à l'intérieur car les matériaux de construction contiennent des radionucléides primitifs. Les doses auxquelles les personnes sont exposées varient d'un endroit à l'autre; elles dépendent des concentrations dans les sols et les roches ainsi que dans les matériaux utilisés pour la construction des maisons. La dose locale annuelle moyenne est d'environ 0,12 mSv pour le potassium 40 et de 0,23 mSv pour l'uranium et le thorium et leurs produits de désintégration.

Le rayonnement externe dû aux radionucléides primitifs s'ajoute au rayonnement attribuable aux rayons cosmiques; les deux sont habituellement mesurés ensemble. Les mesures effectuées par Santé Canada montrent que la dose externe annuelle moyenne dans les régions du Canada où le rayonnement de fond est «normal», est de 0,65 mSv, ce qui correspond à la moyenne dans le reste du monde. Cette dose est plus ou moins la même dans tous les grands centres urbains canadiens. Dans le nord-ouest, autour de Whitehorse et de Yellowknife, la dose est légèrement supérieure à la moyenne et, dans la partie centrale des régions septentrionales, autour de Moosonee et de Churchill, elle est légèrement inférieure. Pendant les trois ou quatre mois d'hiver, la couche de neige offre un certain blindage et le débit de dose externe attribuable aux sources situées dans le sol diminue presque de moitié. La couche de neige réduit également les émanations de radon provenant du sol.

Les radionucléides primitifs pénètrent dans le corps humain de diverses façons. Des poussières contenant ces radionucléides peuvent être transportées par le vent et inhalées; l'eau qui s'est écoulée dans les sols et les roches et qui a dissous ces radionucléides est peut-être utilisée comme eau potable. Enfin, les légumes et les animaux qui ont absorbé ces radionucléides nous servent d'aliments.

La façon dont le potassium 40 pénètre dans le corps humain ou l'endroit où une personne habite n'influent pas sur la dose attribuable à ce radionucléide. En effet, l'activité du potassium 40 par unité de masse de potassium naturel est fixe et la quantité de potassium naturel dans le corps humain est constante; par conséquent, la dose interne reçue est constante. Par exemple, le corps d'un homme adulte moyen renferme environ 2 g de potassium par kilogramme, soit environ 60 Bq de potassium 40. La dose annuelle correspondante est d'environ 0,19 mSv.

La plupart du temps, l'uranium et le thorium pénètrent dans le corps humain par ingestion plutôt que par inhalation. Santé Canada mesure régulièrement la radioactivité et les niveaux de rayonnement dans tout le pays et réalise périodiquement des contrôles ponctuels. Les données canadiennes citées dans le présent chapitre et dans les chapitres subséquents sont extraites de rapports publiés par ce ministère fédéral. Les quantités d'uranium et de thorium qui pénètrent dans le corps humain varient selon l'endroit où la personne réside et selon la façon dont elle obtient sa nourriture et son eau. Dans la plupart des régions, la concentration d'uranium dans l'eau potable de surface est inférieure à 1 mBq par litre, mais, dans certaines régions, la concentration peut être beaucoup plus élevée, surtout lorsque l'eau potable provient de puits. Selon un rapport publié par l'UNSCEAR en 1982, on a mesuré une concentration de 200 Bq par litre dans l'eau potable provenant d'un puits à Helsinki (Finlande). À Regina, où une partie de l'eau provient de puits, la concentration moyenne est d'environ 150 mBq par litre.

Bien que le thorium et l'uranium aient approximativement la même concentration dans le sol, le thorium est mal absorbé dans le système digestif, de telle sorte qu'il contribue moins à l'exposition de l'être humain que l'uranium. Le radium 226, l'un des produits de désintégration de l'uranium 238, peut contribuer de façon importante à la dose interne. Normalement, la nourriture constitue une source de radium 226 plus importante que l'inhalation ou l'ingestion d'eau potable de surface. Cependant, l'eau provenant d'un puits peut avoir une concentration élevée en radium 226. Dans certains pays, on a relevé des concentrations supérieures à 100 mBq de radium 226 par litre d'eau de puits. Nulle part au Canada n'a-t-on observé des concentrations aussi élevées dans l'eau potable. La concentration la plus élevée a été relevée à Elliot Lake et elle était inférieure à 20 mBq par litre. Des mesures de concentration de radium 226 dans l'eau potable ont été effectuées à Ottawa, Port Hope et Regina. La concentration est inférieure à 5 mBq par litre. À cette concentration, la dose annuelle moyenne reçue au Canada par exposition interne à l'uranium et au thorium, et à leurs produits de désintégration, est d'environ 0,04 mSv.

Produits de désintégration du radon

Le radium se désintègre en radon et en thoron, deux gaz radioactifs qui sont beaucoup plus mobiles que l'uranium, le thorium et leurs produits de désintégration solides, comme le radium. Le radon et le thoron filtrent à travers le sol et pénètrent dans l'atmosphère où ils sont vite transportés par le vent. Les expositions subséquentes sont relativement faibles. Cependant, les gaz peuvent aussi s'infiltrer dans les maisons, la plupart du temps par le plancher et les murs du sous-sol. Si les matériaux de construction contiennent de l'uranium

et du thorium, le radon et le thoron peuvent également pénétrer dans la maison à partir de cette source. Lorsqu'ils se désintègrent, ces gaz forment des produits radioactifs solides qui se fixent aux particules de poussière et qui peuvent pénétrer dans le corps humain par inhalation; ce sont alors les poumons qui sont exposés. À l'intérieur des bâtiments, ces gaz radioactifs ne peuvent pas être entraînés par le vent, et leurs concentrations, ainsi que celles de leurs produits de désintégration, augmentent.

On se préoccupe de plus en plus du radon et du thoron depuis que les normes de construction ont changé et que l'on cherche à économiser l'énergie. À mesure que les taux d'aération ont diminué dans les maisons, les concentrations des produits de désintégration du radon et du thoron ont augmenté. Dans certaines régions du Canada, de la terre à forte teneur en radium a été utilisée comme matériau de remplissage autour des murs des sous-sols. On a observé des concentrations élevées de radon dans les sous-sols de ces maisons.

Le niveau de radon dans les bâtiments dépend de la quantité de radium contenue dans l'eau de puits et dans les roches et le sol qui entourent le bâtiment, du type de matériau de construction utilisé et du taux d'aération. On a vérifié les concentrations des produits de désintégration du radon dans plus de 13 000 maisons réparties dans 19 villes canadiennes. La concentration moyenne de produits de désintégration du radon était de 17 Bq/m^3, ce qui correspondrait à une dose effective de 1 mSv par an. Toutefois, les mesures ont été effectuées en été, alors que les maisons sont habituellement plus aérées qu'en hiver, et il est donc probable que les doses réelles soient plus élevées. On a observé de grandes différences à l'échelle du pays, mais c'est à l'intérieur des villes que les différences étaient habituellement plus grandes.

Plusieurs endroits où l'on soupçonnait des concentrations élevées ont également fait l'objet de contrôles. Ainsi, dans le comté de March, près d'Ottawa, on a mesuré les concentrations dans 343 maisons à cause de la présence, à proximité, de gisements d'uranium avec des concentrations en uranium de 5 ppm. Dans plus de la moitié des maisons, les concentrations de produits de désintégration du radon étaient inférieures à 19 Bq/m^3. La concentration moyenne était de 50 Bq/m^3 et la concentration maximale était de 700 Bq/m^3. Dans une région de Colombie-Britannique, on avait observé des concentrations élevées de radon dans l'eau. Dans près de la moitié des maisons qui ont fait l'objet d'un contrôle, les concentrations des produits de désintégration du radon étaient inférieures à 19 Bq/m^3. La valeur moyenne était de 74 Bq/m^3 et la valeur maximale était de 2900 Bq/m^3.

Il n'a pas été prouvé directement que l'exposition aux concentrations des produits de désintégration du radon observées dans les maisons est dangereuse. Toutefois, Santé Canada a fixé une limite de 800 Bq/m^3 pour la concentration maximale de radon dans les maisons. Il est recommandé de prendre les mesures nécessaires pour réduire la concentration de radon si cette limite est dépassée.

Il existe plusieurs moyens de réduire les concentrations de radon et de ses produits de désintégration. Si les concentrations sont élevées parce que l'on a utilisé un matériau riche en radium, provenant de mines ou de résidus, comme matériau de remplissage, on peut enlever ce matériau. On peut également empêcher le radon de pénétrer dans les maisons en installant une barrière entre la source et l'intérieur de la maison. Ainsi, l'installation d'un système d'aération sous le plancher, avec, par exemple, des tuiles poreuses et une évacuation dans un conduit ou une cheminée, permettra d'entraîner le radon vers l'extérieur de la maison. Enfin, il est possible de réduire les concentrations de radon dans les maisons en nettoyant l'air, par filtrage ou tout autre moyen, ou tout simplement en augmentant le taux de renouvellement de l'air. Si l'on utilise cette dernière méthode, il faut prévoir l'installation d'un échangeur de chaleur air-air pour réduire les pertes thermiques.

Les données disponibles ne permettent pas d'établir une valeur précise de la dose moyenne reçue par une personne vivant au Canada, attribuable aux produits de filiation du radon. Le débit de dose provenant de cette source varie considérablement d'un endroit à un autre, et même à l'intérieur d'une ville. La valeur de la dose effective moyenne adoptée ici est de 1 mSv par personne par an, mais cette valeur est entachée d'une très grande incertitude.

Doses totales

La dose totale moyenne à l'échelle mondiale attribuable au rayonnement d'origine naturelle est d'environ 2 mSv par an. On peut utiliser cette valeur au Canada, mais, dans certaines régions, la dose moyenne sera plus élevée et elle pourra peut-être même atteindre 3 mSv par an.

Dose effective annuelle moyenne attribuable au rayonnement naturel

Sources	mSv
Rayonnement externe	
Cosmique	0,30
Primitif	0,35
Total (externe)	0,65
Rayonnement interne	
Primitif	0,35
Origine cosmique	0,01
Radon	1,0
Thoron	0,1
Total (interne)	1,5
Total (arrondi)	2

CHAPITRE 7

LES UTILISATIONS MÉDICALES

Après le rayonnement naturel, les plus importantes sources d'exposition aux rayonnements ionisants pour les Canadiens sont les radiographies médicales et dentaires et les traitements médicaux faisant appel à des substances radioactives. En médecine, le rayonnement est utilisé à deux fins : pour diagnostiquer les maladies et pour détruire les cellules cancéreuses (radiothérapie). Dans les principaux pays industrialisés, la dose moyenne de rayonnement administrée pour des raisons médicales est presque de 1 mSv par année. Cela correspond à la moitié ou au tiers de la dose moyenne de rayonnement naturel dans la plupart des régions.

Les examens diagnostiques aux rayons X représentent environ 90 % de la dose de rayonnement reçue par la population à des fins médicales. Dans les pays industrialisés, le nombre annuel de ces examens, y compris les radiographies dentaires, varie de 300 à près de 2000 par 1000 habitants. La fraction attribuable aux radiographies dentaires se situe entre 1 et 30 %. Au Canada, on réalise annuellement environ 1200 radiographies diagnostiques par 1000 habitants dont 14 % sont des radiographies dentaires.

EXAMENS RADIOGRAPHIQUES AU CANADA POURCENTAGE SELON LE TYPE D'EXAMEN ET LA CONTRIBUTION À LA DOSE COLLECTIVE

Examen	Pourcentage	
	De tous les examens	De la dose collective*
Membres	22	0,9
Thorax	25	1,7
Dents	13	0,4
Rachis	9	14
Tête	5	1
Tube digestif	9	43
Abdomen	2	4
Appareil urinaire	2	12
Autres	13	23

* Estimation fondée sur des données du R.-U. visant la dose administrée par type d'examen.

Un examen diagnostique utilisé beaucoup moins fréquemment que la radiographie consiste à administrer au patient par voie interne un radionucléide émetteur de rayons gamma et à observer le comportement de ce radionucléide dans l'organisme afin d'étudier le fonctionnement d'un organe ou la circulation du sang.

Dans la plupart des examens diagnostiques, la dose de rayonnement employée est faible; elle est cependant élevée en radiothérapie anticancéreuse, un traitement appliqué à un nombre

relativement faible de patients dont la vie est déjà en danger dans le but de détruire les cellules tumorales. Les doses atteignant les tissus sains sont réduites au minimum.

RADIOGRAPHIES DIAGNOSTIQUES

Toutes les matières absorbent les rayons X à divers degrés selon leur densité et leur composition chimique. Lorsque les rayons X traversent des tissus de densité et de composition différentes, ils produisent divers degrés de noircissement sur le film radiographique placé derrière le patient. Les os étant particulièrement denses, ils apparaissent clairement sur la radiographie, de sorte qu'il est facile d'y repérer fissures et fractures. À l'examen des radiographies, un spécialiste peut détecter dans d'autres tissus des changements plus subtils susceptibles de fournir des indices sur la présence d'une maladie.

Près de 31 millions d'examens radiologiques sont pratiqués annuellement au Canada, ce qui représente environ un examen par personne par année. Les radiographies du thorax comptent pour environ 26 % du total; elles sont suivies des radiographies de l'épaule, du bassin et des membres qui représentent 22 %. Si l'on inclut les radiographies dentaires, on obtient environ 60 % du nombre total. Ces examens nécessitent des doses relativement faibles de rayonnement, de l'ordre de 0,02 mSv environ pour un examen dentaire; des mesures récentes indiquent que la dose moyenne délivrée au cours d'une radiographie diagnostique du thorax au Canada est d'environ 0,07 mSv.

Des doses beaucoup plus importantes sont utilisées dans les examens des voies digestives et urinaires, deux types d'examens qui requièrent des expositions multiples ainsi que l'administration de substances opacifiantes permettant de visualiser les parties molles. Au cours de ces examens, les patients peuvent recevoir une dose de rayonnement allant jusqu'à 1 mSv. Les radiographies du rachis représentent environ 9 % de tous les examens diagnostiques pratiqués au Canada. Elles nécessitent des doses de rayonnement plus faibles que les examens du tube digestif mais plus élevées que les radiographies du thorax.

NOMBRE APPROXIMATIF D'EXAMENS RADIOLOGIQUES PRATIQUÉS ANNUELLEMENT AU CANADA
31 millions

Bien que le nombre d'examens radiodiagnostiques ait augmenté de manière appréciable au cours des dernières années, les doses reçues par l'ensemble de la population ont eu tendance à diminuer à cause des améliorations apportées aux appareils radiologiques et aux techniques d'examen.

Néanmoins, des mesures effectuées en Grande-Bretagne en 1983-1984 montrent des différences importantes, allant jusqu'à un facteur 100, entre la dose la plus élevée et la dose la plus faible au cours d'un même type d'examen, selon l'endroit où cet examen est effectué.

Des différences aussi importantes existent probablement ailleurs, y compris au Canada. Dans un même établissement médical, la dose administrée pendant un examen donné peut différer d'un patient à l'autre en raison des besoins individuels. Les doses moyennes individuelles reçues au cours des examens radiodiagnostiques peuvent également varier d'un pays à l'autre, comme le montre le tableau ci-dessous.

L'acquisition de ces mesures est difficile et coûteuse. Les méthodes employées varient d'une étude à l'autre à l'intérieur d'un même pays et les résultats obtenus peuvent être différents. On estime à 0,6 mSv environ la dose moyenne individuelle de rayons X administrée à des fins diagnostiques au Canada; il s'agit d'une dose faible par rapport aux pays dont le niveau de soins médicaux est semblable à celui du Canada, c'est-à-dire qui comptent moins de 1000 patients par médecin. Cette dose pourrait bien être plus élevée au Canada; sa valeur s'approcherait peut-être de celle qui est indiquée dans le tableau pour les États-Unis. Ce qu'il faut retenir, c'est que même au Royaume-Uni, la dose de rayonnement délivrée au cours des examens médicaux est beaucoup plus élevée que la dose attribuable à toutes les autres sources artificielles de rayonnement. Par conséquent, il importe de réduire le plus possible les doses administrées à des fins médicales tout en maintenant une qualité d'image acceptable. Beaucoup d'efforts ont été et sont encore consacrés à l'amélioration des techniques et des appareils en vue de réduire la dose de rayonnement délivrée au cours de chaque examen.

DOSE ANNUELLE PROVENANT D'EXAMENS DIAGNOSTIQUES AUX RAYONS X AU CANADA

Dose collective	16 200 Sv•personnes
Dose moyenne individuelle	0,6 mSv

TOMODENSITOMÉTRIE

La tomodensitométrie est une technique de plus en plus employée dont la découverte remonte aux années 70. Elle fait appel à un scanographe du corps entier et à la tomographie informatisée. Elle est réalisée comme suit : une source de rayons X décrit un

DOSE ANNUELLE MOYENNE DE RAYONS X DANS DIVERS PAYS

Pays	Dose (mSv)	Pays	Dose (mSv)
Pologne	1,7	Italie	0,8
France	1,6	Espagne	0,8
URSS	1,4	Finlande	0,7
Japon	1,3	Suède	0,6
États-Unis	1,3	Royaume-Uni	0,2

mouvement de rotation autour du corps du patient et une série de détecteurs mesure l'atténuation des rayons une fois qu'ils ont traversé le corps du patient. Les nombreuses données ainsi acquises sont transmises à un ordinateur qui reconstruit une image en coupes du corps du patient. À la différence de l'examen radiographique classique, qui représente la somme des effets exercés par les rayons X dans des tissus aux propriétés d'absorption différentes, la tomodensitométrie reconstruit une image séparée de ces effets dans une coupe mince du corps.

Dix ans après l'apparition de la tomodensitométrie, plus de 2000 scanographes étaient utilisés aux États-Unis seulement et le nombre d'appareils en usage augmentait au rythme d'environ 200 par année. Au Manitoba, le nombre de tomodensitométries réalisées en 1977 était de 0,85 par 1000 habitants. En 1980, il avait atteint 4,6 par 1000 habitants et en 1987, il était passé à 18,2 par 1000 habitants. La même tendance a été observée au Québec, où le nombre de tomodensitométries est passé de 1,4 par 1000 habitants en 1977 à près de 10 par 1000 habitants en 1988.

Au Manitoba, la dose moyenne par année par personne est passée de 0,0007 mSv en 1977 à 0,081 mSv en 1987. Cette augmentation est attribuable au nombre presque cinq fois plus élevé de tomodensitométries pratiquées et à une augmentation du même ordre de la dose à chaque examen. Toujours au Manitoba, la dose administrée à chaque tomodensitométrie est passée d'un peu moins de 1 mSv à 45 mSv environ entre 1977 et 1987. On prévoit que le nombre d'examens finira par atteindre 28 par 1000 habitants. À ce moment, la dose moyenne individuelle sera de 0,12 mSv par année. La tomographie informatisée rejoindra les examens diagnostiques comme le lavement baryté qui contribuent de manière appréciable à la dose de rayonnement reçue par la population au cours des examens diagnostiques.

Les applications de la physique et de ses techniques aux examens diagnostiques changent rapidement avec l'introduction de nouvelles technologies et l'élargissement du champ d'application des techniques plus anciennes. Ces technologies ne sont pas toutes fondées sur le rayonnement et certaines d'entre elles remplacent déjà les techniques radiologiques. Ainsi, on a constaté une nette augmentation de l'utilisation des ultrasons qui commencent à remplacer les méthodes radiologiques classiques dans les examens des voies urinaires et dans d'autres examens. On prévoit un changement appréciable de la distribution et du volume des expositions médicales au rayonnement au cours des prochaines décennies.

MÉDECINE NUCLÉAIRE

En médecine nucléaire, on administre au patient, par voie orale ou intraveineuse, un médicament lié à un radionucléide émetteur de rayons gamma. Le médicament est choisi à cause de son absorption préférentielle par l'organe ou le tissu dont on souhaite étudier la fonction. La progression du médicament est ensuite suivie à l'aide d'une caméra à scintillation. Parfois, un médicament radioactif peut être utilisé dans un but thérapeutique, par exemple dans le traitement des affections de la thyroïde.

Les examens de médecine nucléaire ont augmenté rapidement au cours des 20 dernières années, mais leur nombre se place encore loin derrière celui des radiographies diagnostiques. Le nombre de radiographies diagnostiques atteint plusieurs centaines par 1000 habitants alors que celui des examens de médecine nucléaire est plutôt de l'ordre de dizaines par 1000 habitants.

Le technétium 99^m est le radionucléide le plus fréquemment utilisé dans les examens diagnostiques fondés sur les radionucléides. Lié à une substance appropriée, il est employé pour diagnostiquer les affections et dysfonctionnements du cerveau, des os, du foie et du rein et pour étudier la circulation sanguine. Le technétium 99^m résulte de la désintégration bêta du molybdène 99, dont les principales réserves mondiales sont produites dans un réacteur canadien à Chalk River.

RADIOTHÉRAPIE

La radiothérapie est utilisée dans le traitement du cancer pour détruire les cellules tumorales; elle est réalisée au moyen de faisceaux de rayons gamma de haute énergie générés par le cobalt 60 ou par un accélérateur. Certaines tumeurs peuvent aussi être traitées par des sources radioactives insérées dans l'organisme au moyen d'applicateurs conçus à cette fin.

Le Canada est un des principaux fournisseurs de cobalt 60, d'appareils de traitement au cobalt 60 et d'accélérateurs. Le but du traitement est de diriger une forte dose de rayonnement sur la tumeur mais une dose aussi faible que possible sur les tissus sains adjacents. Pour ce faire, on fait tourner autour du patient un appareil générant un faisceau étroit de rayonnement hautement énergétique. Dans chaque cas, le profil et les propriétés du faisceau sont soigneusement étudiés par le physicien médical afin de maximiser la destruction de la tumeur et de prévenir les complications liées à l'irradiation des tissus sains. Il n'en reste pas moins que le traitement est draconien et qu'il comporte des effets secondaires désagréables.

Les sources radioactives émettrices de rayonnement bêta sont utiles dans le traitement des tumeurs superficielles comme les tumeurs de la peau. Elles offrent l'avantage d'une très faible irradiation des tissus profonds sous-jacents.

LIMITATION DES EXPOSITIONS À DES FINS DIAGNOSTIQUES

L'exposition à des fins de diagnostic médical diffère de l'exposition aux autres sources artificielles de rayonnement parce que, dans une certaine mesure, elle est contrôlée personnellement par le patient, lequel est renseigné sur les risques et bénéfices escomptés par un conseiller médical connaissant son état mental et physique. Dans ce contexte, il n'est donc pas approprié d'intervenir par des mesures réglementaires pour établir des limites de dose. Néanmoins, les autres principes de la radioprotection s'appliquent. La dose de rayonnement délivrée et les risques inhérents doivent être justifiés par les bénéfices escomptés; on ne doit pas disposer d'autres méthodes plus sûres et dont l'efficacité est au moins égale; de plus, il faut administrer la dose la plus faible qui permette d'obtenir le résultat médical recherché. L'application de ces principes est évidemment importante à la fois pour le patient et pour la société, en raison des doses relativement élevées qui sont absorbées à l'échelle de la population. Au moyen de données obtenues au Royaume-Uni sur les doses délivrées par examen et par type d'examen et du nombre d'examens de chaque type effectués au Canada, il est possible d'estimer la dose moyenne individuelle reçue par les Canadiens. Cette dose correspond à environ 0,6 mSv par année, contre 0,28 mSv au Royaume-Uni et 0,6 mSv aux États-Unis. Près des trois quarts de la dose totale calculée pour le Canada proviennent des examens radiodiagnostiques du tube digestif et de la vésicule biliaire.

Comme les radiographies diagnostiques sont à l'origine de la plus grande part de la dose collective de rayonnement, il importe de poursuivre nos efforts pour réduire le nombre de ces examens. Maintenir un faible niveau d'exposition sans compromettre la justesse et les effets bénéfiques des radiographies diagnostiques exige une attention constante de la part des médecins et radiologues. Les appareils doivent être réglés et entretenus correctement et toutes les mesures nécessaires doivent être prises pour maintenir le faisceau centré sur la région visée. L'exposition du patient doit être limitée à la dose qui est absolument nécessaire. De plus, le patient est en droit de poser des questions sur la répétition des examens radiographiques.

CHAPITRE 8

LES UTILISATIONS INDUSTRIELLES

Les utilisations médicales des rayonnements présentent d'importants avantages sur le plan humain. Il existe aussi des utilisations industrielles qui sont aussi importantes et avantageuses. Au Canada, on dénombre environ 3000 permis de matières radioactives pour des utilisations tant industrielles que scientifiques. Les utilisations varient selon les caractéristiques uniques des rayonnements ionisants. La plupart se répartissent en trois groupes : les utilisations qui dépendent du pouvoir pénétrant des rayonnements; les utilisations qui font intervenir des sources de neutrons et leur capacité de rendre des matériaux radioactifs; et les utilisations qui dépendent de la capacité des rayonnements ionisants de détruire ou d'endommager de quelque façon des matières vivantes.

Le premier de ces groupes concerne la radiographie industrielle, les mesures au moyen de jauges de niveau et les jauges d'épaisseur industrielles. Le deuxième groupe comprend les diagraphies, et les méthodes de détection et d'analyse des traces d'éléments dans les matières vivantes et dans l'environnement. Le troisième groupe comprend les techniques de stérilisation du matériel médical, de conservation des aliments et d'éradication des insectes nuisibles. D'autres utilisations (par exemple, détecteurs de fumée, éliminateurs d'électricité statique et systèmes d'éclairage d'urgence) exploitent d'autres caractéristiques uniques des rayonnements.

RADIOGRAPHIE INDUSTRIELLE

La radiographie industrielle ressemble à la radiographie médicale, sauf que les sujets sont des objets inanimés au lieu de parties du corps humain. Les installations fixes sont parfois équipées de machines à rayons X, tandis que les appareils portatifs exploitent surtout des sources de rayonnement gamma.

Un appareil très simple est illustré dans les figures 8.1A et 8.1B. La source est montée dans une enceinte blindée à obturateur pivotant : dans une position, la source est cachée (figure 8.1A); dans l'autre, elle émet par un orifice un faisceau de rayons gamma. L'image produite sur un film placé derrière un objet situé dans le faisceau varie selon l'épaisseur et la densité de l'objet (figure 8.1B). Les défauts de l'objet comme les porosités et les fissures sont visibles sur le film. Ce type d'appareil

radiographique n'est pas autorisé au Canada, mais l'est dans d'autres pays. Il est décrit ici parce qu'il permet d'illustrer simplement le principe de la gammagraphie industrielle.

Le type et l'intensité de la source gamma utilisée dépendent de la masse de l'objet et du matériau dont ce dernier est constitué. Des sources qui émettent des rayons gamma très énergétiques servent à radiographier les objets massifs et denses, et des sources qui émettent des rayons gamma de faible énergie sont utilisées pour radiographier les objets fins et légers.

L'iridium 192 est d'emploi courant parce qu'il convient à la radiographie des soudures et des robinets dans les conduites des raffineries, des réseaux de distribution du gaz et de l'eau, des centrales électriques, des installations de chauffage, etc. L'appareil le plus utilisé à cette fin est l'appareil à furet. La source, logée dans une enceinte blindée et fixée au bout d'un long câble qui est déroulé au moyen d'une manivelle, est poussée dans un tube-guide jusqu'à un endroit prédéterminé, par exemple dans une conduite à la hauteur d'une soudure. Un film placé autour de la conduite recueille l'image de la soudure et en révèle les défauts (figure 8.2). Le radiographe préposé à l'appareil peut ainsi se tenir bien à l'écart de la source et ne recevoir qu'une très faible dose pendant la radiographie.

SOURCES INDUSTRIELLES DE RAYONS GAMMA ET LEURS APPLICATIONS

Sources	Application et limites d'épaisseur
Thulium 170	0,25 à 1,5 cm de plastique, bois, alliage léger, acier ou équivalent
Idrium 192	1 à 6 cm d'acier ou équivalent
Césium 137	2,5 à 8 cm d'acier ou équivalent
Cobalt 60	6 à 22 cm d'acier ou équivalent

FIGURE 8.1A
ENCEINTE D'EXPOSITION À OBTURATEUR PIVOTANT, SOURCE CACHÉE

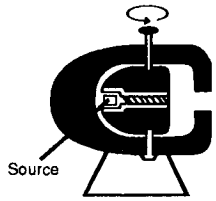
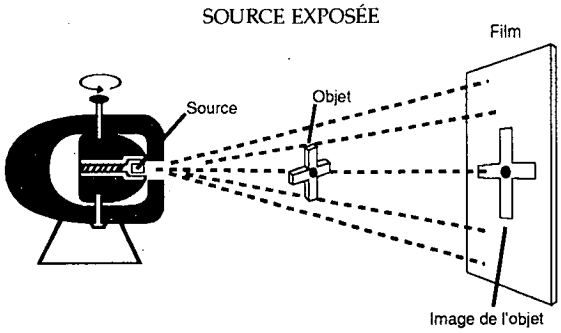


FIGURE 8.1B
ENCEINTE D'EXPOSITION À OBTURATEUR PIVOTANT, SOURCE EXPOSÉE



Plus de 140 sociétés détiennent des permis de radiographie (source radioactive) au Canada. Ce procédé non destructif sert à examiner les soudures, les joints, les robinets, etc., dans les établissements industriels, ce qui permet de réaliser des tuyauteries de grande qualité et de réduire le risque de défaillances aux conséquences graves.

De gros accidents faisant intervenir des sources radiographiques se sont produits partout dans le monde. Les conditions et le milieu de travail semblent plus propices aux accidents là où s'effectue de la radiographie que partout ailleurs où des rayonnements sont utilisés. Il faut prévoir une réglementation très judicieuse pour assurer un niveau suffisant de sécurité dans les travaux de radiographie.

JAUGES NUCLÉAIRES

Dans les méthodes modernes de production, surtout les procédés automatiques, il faut contrôler la qualité des produits et assurer la régulation du procédé de fabrication. Le contrôle et la régulation sont souvent réalisés par des dispositifs qui exploitent des sources radioactives et le pouvoir pénétrant des rayonnements. La figure 8.3 représente une jauge qui commande la hauteur du niveau d'un liquide dans un réservoir.

Les jauges de niveau à sources radioactives ont un avantage sur les autres types de jauges. Elles n'exercent aucun contact avec le matériau contrôlé ou examiné et peuvent donc être utilisées pour le contrôle de procédés rapides et de matériaux portés à des températures extrêmes ou ayant des propriétés chimiques dangereuses.

FIGURE 8.2
APPAREIL RADIOGRAPHIQUE À FURET

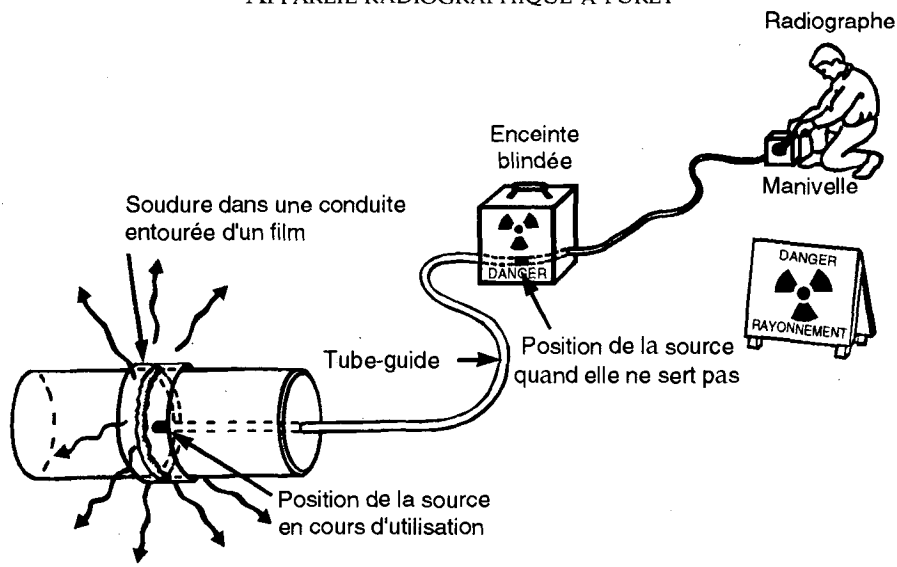
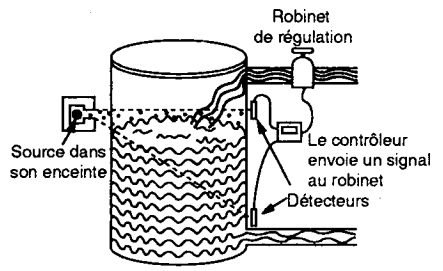


FIGURE 8.3
RÉGULATION DU NIVEAU AU MOYEN D'UNE SOURCE RADIOACTIVE



Une autre application utile de ce type de jauge est le contrôle de l'écoulement d'un matériau dans une conduite ou une chute. Dans les centrales au charbon, l'écoulement du charbon dans la chambre de combustion est contrôlé de cette façon (figure 8.4). Si l'écoulement est bloqué, une alarme est déclenchée, ce qui permet d'intervenir pour rétablir l'écoulement.

Des versions portatives de jauges exploitant le principe de l'absorption de rayonnements sont utilisées pour mesurer la densité du sol. Dans sa forme la plus simple, la jauge comprend une source gamma placée dans un trou creusé à même le sol et un détecteur placé dans un autre trou proche ou à la surface et dont les indications sont fonction de la densité du sol (figure 8.5).

FIGURE 8.4
JAUGE À TRANSMISSION POUR CONTRÔLER UN ÉCOULEMENT DE CHARBON

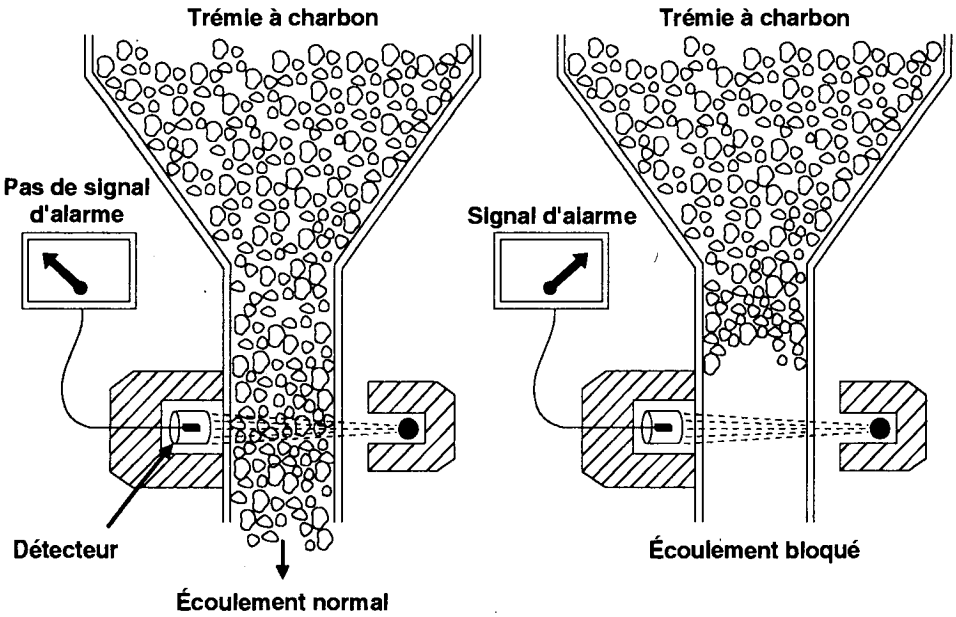


FIGURE 8.5
JAUGE DE DENSITÉ DU SOL - TYPE À TRANSMISSION

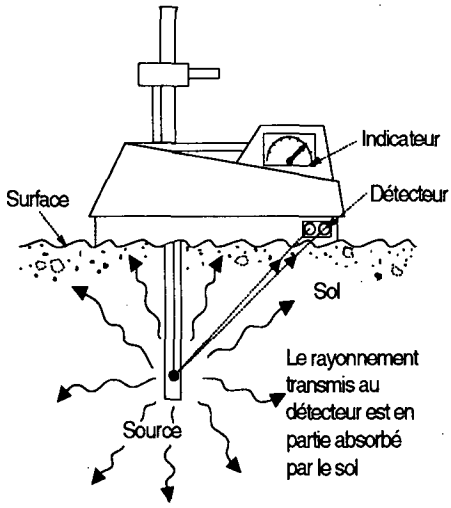
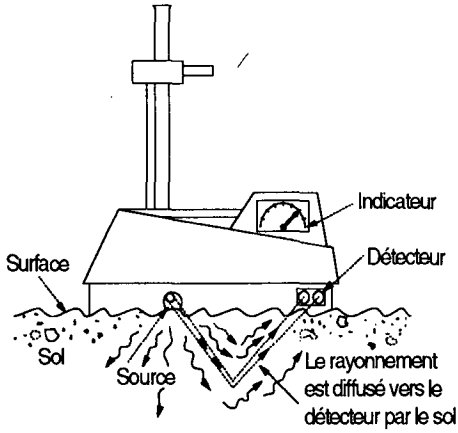


FIGURE 8.6
JAUGE DE DENSITÉ DU SOL - TYPE À RÉTRODIFFUSION



On peut aussi estimer la densité du sol en mesurant le rayonnement réfléchi ou «rétrodiffusé» par le sol (figure 8.6). Plus un matériau est dense, plus il rétrodiffuse un rayonnement, de sorte que la jauge peut être étalonnée de manière à indiquer la densité du sol. Les jauges portatives de ce type, équipées de sources et de détecteurs de neutrons, peuvent servir à mesurer l'humidité du sol. Les neutrons sont très facilement rétrodiffusés par les atomes d'hydrogène des molécules d'eau.

Cela fait 40 ans qu'on utilise des jauges de densité et d'humidité du sol en génie civil, en agriculture et en hydrologie. Par exemple, les ingénieurs civils les utilisent pour établir comment le sol se déforme sous l'action de charges ou combien il se tasse. En agriculture, des estimations d'humidité permettent de prévoir le rendement des cultures. En hydrologie, on peut estimer la quantité d'eau consommée et évaporée par la végétation. Tous ces instruments sont construits selon des normes rigoureuses qui, ajoutées aux exigences des permis de la CCEA, assurent que leur utilisation est hautement sécuritaire. Les doses reçues par les opérateurs de ces instruments sont inférieures à 1 mSv par année.

Les instruments à sources bêta conviennent surtout au contrôle de l'épaisseur des feuilles de plastique ou de papier en cours de fabrication. Les rayons bêta de faible énergie sont facilement

absorbés par les couches minces constituées de ces matériaux. Un détecteur et une source de rayons bêta de faible énergie sont placés de part et d'autre de la feuille de papier à sa sortie des machines de production. Si l'épaisseur de papier passe en deça de la cote désirée, le signal du détecteur est amplifié, et le contrôleur du procédé écarte les cylindres. L'effet est opposé si l'épaisseur augmente (figure 8.7).

ANALYSE PAR ACTIVATION NEUTRONIQUE

L'analyse par activation neutronique est un outil puissant d'analyse de la composition élémentaire des matériaux. Les neutrons peuvent réagir avec les atomes des éléments de diverses manières. Une de ces réactions est la réaction neutron-gamma, habituellement désignée réaction (n,γ). La figure 8.8 illustre ce qui se passe normalement dans une réaction (n,γ).

Un neutron émis par une source quelconque frappe un noyau cible et forme un noyau composé qui émet instantanément un rayon gamma, appelé *rayon gamma instantané*. Après l'émission de tels rayons gamma, les atomes en cause sont encore instables, c'est-à-dire radioactifs, et en général se désintègrent en émettant un rayon bêta et un rayon gamma. L'analyse par activation neutronique consiste à mesurer l'énergie du rayon gamma instantané ou du rayon gamma issu de la désintégration. Comme l'énergie de ces rayons gamma est caractéristique du noyau cible, ce dernier peut donc être identifié sans équivoque. La méthode utilisant les rayons gamma instantanés permet des mesures en direct ou en continu. La méthode utilisant les rayons gamma de désintégration convient plutôt à l'analyse d'un seul échantillon ou de plusieurs lots. Pour certains éléments, cette technique permet de mesurer d'infimes quantités.

FIGURE 8.7
CONTRÔLEUR D'ÉPAISSEUR DU PAPIER

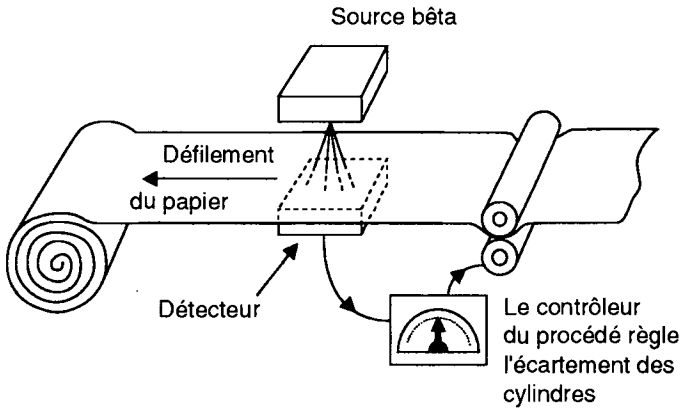
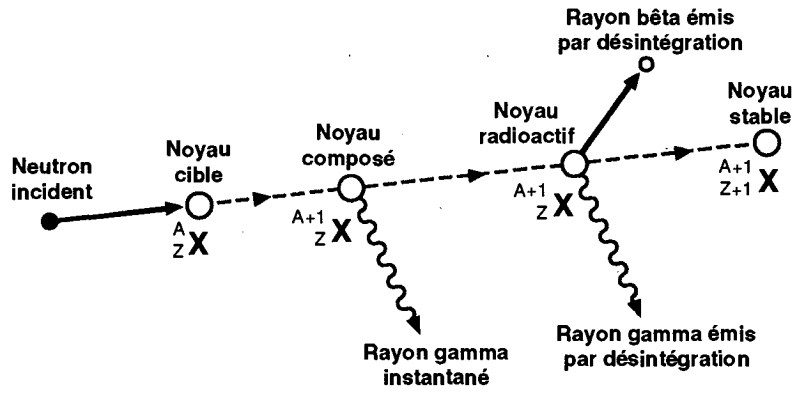


FIGURE 8.8
SÉQUENCE DES ÉVÉNEMENTS DANS UNE RÉACTION (n,γ) TYPE



A = nombre de protons et de neutrons dans le noyau cible
Z = nombre de protons dans le noyau cible

Le tableau qui suit indique les seuils de détection de certains éléments dans l'analyse par lots. Ces seuils peuvent être mesurés simultanément, dans un échantillon d'un gramme, sans traitement chimique de l'échantillon. Des seuils beaucoup plus faibles peuvent être détectés dans les analyses chimiques, avec un échantillon plus gros et un flux de neutrons plus important. Par exemple, le seuil pour le cuivre peut être d'à peine 0,1 milliardième de gramme (10^{-13} g) par gramme d'échantillon.

SEUILS DE DÉTECTION TYPES DE L'ANALYSE PAR ACTIVATION NEUTRONIQUE DANS UN GRAMME DE ROCHE

Élément	Seuil de détection (μg)
Cobalt	0,1
Chrome	0,5
Arsenic	1
Or	2
Zinc	10
Nickel	50

L'analyse par activation neutronique est utilisée en archéologie, dans les sciences de l'environnement, en géologie, en médecine courante, en médecine légale et en général dans l'industrie. Dans les sciences de l'environnement, on peut détecter de très faibles traces de contaminant (par exemple, le cuivre) dans les animaux, les oiseaux, le poisson, les aliments, les eaux souterraines, les eaux de pluie et la végétation. Même pour le plomb, il est possible d'en déceler dix millionièmes de gramme dans un échantillon. En plus d'être très sensible, l'analyse par activation neutronique permet de doser simultanément jusqu'à 30 éléments dans un très petit échantillon sans détruire ce dernier.

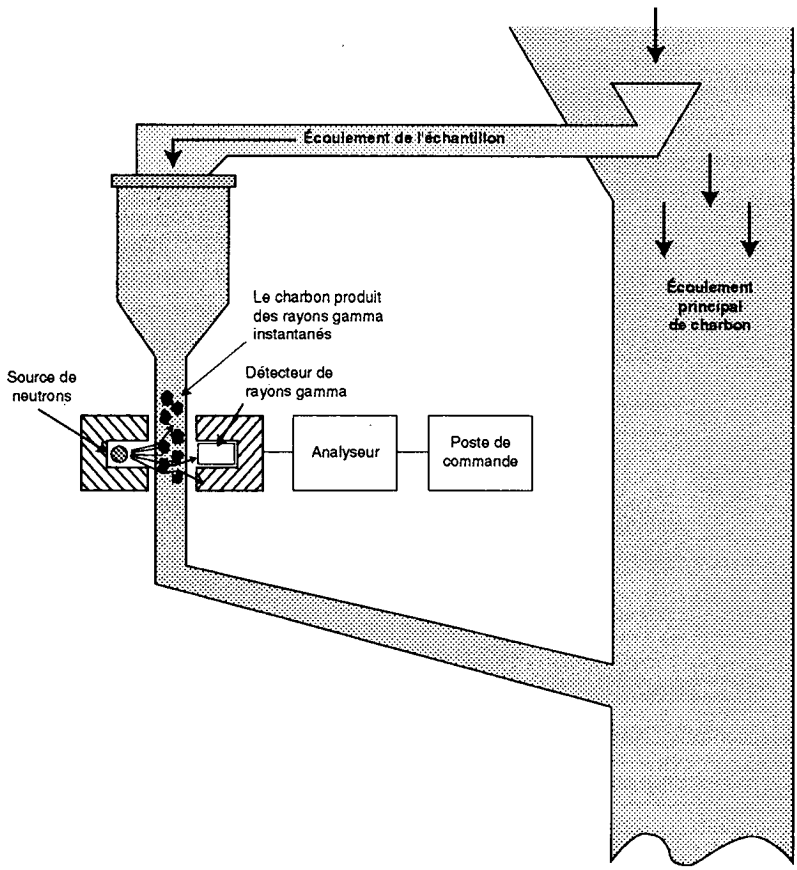
L'analyse en direct permet de mesurer les énergies des rayons gamma instantanés émis lorsqu'une substance est bombardée par des neutrons (figure 8.8).

Ces énergies sont caractéristiques des atomes cibles, ce qui permet de reconnaître ces derniers et d'en estimer le nombre.

Une application courante consiste à mesurer la concentration des éléments contenus dans les minerais, le charbon, le ciment et les mélanges de verre bruts. Un petit échantillon est prélevé en continu à même la masse de matières convoyées. Il est ensuite exposé à un faisceau de neutrons provenant d'une source de neutrons, et les éléments constituants du minerai ou du charbon sont identifiés par les rayons gamma instantanés émis. Le schéma d'un analyseur de charbon type est présenté à la figure 8.9. Le procédé peut être utilisé pour contrôler la qualité, le mélange ou le calibrage du charbon.

Une autre application est la diagraphie des puits, surtout des puits de pétrole. Les sociétés de forage de puits de pétrole ou d'eau cherchent à se renseigner sur les couches de roche qu'elles doivent traverser et sur le contenu en pétrole ou en eau des couches.

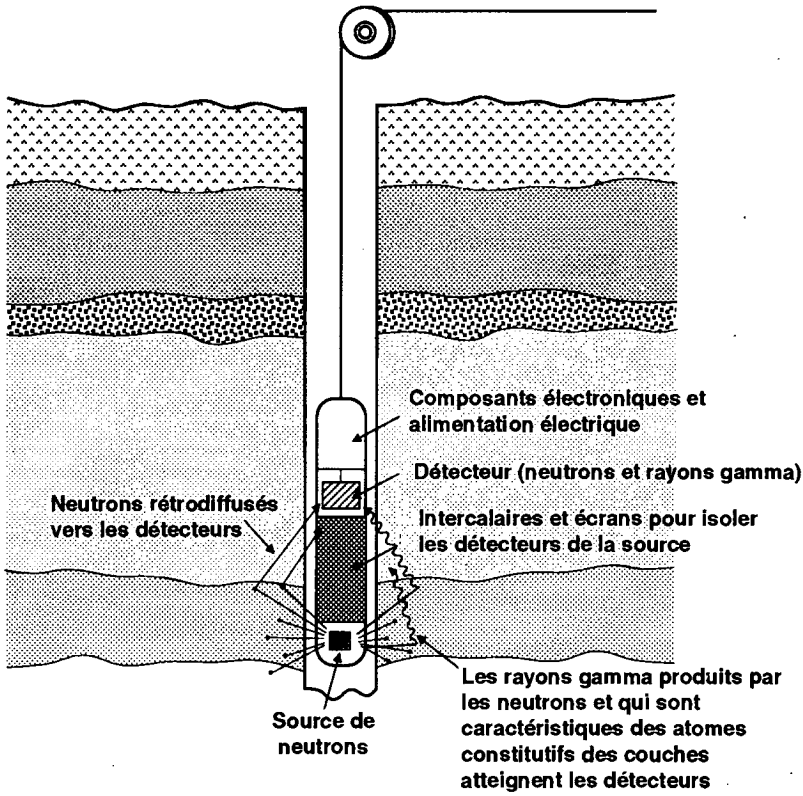
FIGURE 8.9
ANALYSEUR EN DIRECT DE CHARBON EN VRAC



La diagraphie d'un puits au moyen de sources de rayonnement gamma et de neutrons fournit les renseignements recherchés. Une sonde contenant une source de neutrons et un détecteur de rayons gamma est descendue dans le puits. Les mesures des rayons gamma instantanés caractéristiques des matériaux constituant la paroi permettent d'identifier les éléments contenus dans la roche. Dans une diagraphie, on mesure aussi le rayonnement rétrodiffusé (abordé dans la partie sur les jauges portatives). Les sources de rayons gamma utilisées à cette fin renseignent sur le type de roche traversée. Si la sonde comporte un détecteur de neutrons en plus d'une source de neutrons, elle peut renseigner sur le contenu de la roche en pétrole ou en eau. L'ensemble détecteur-source est illustré à la figure 8.10.

À mesure que la source et le détecteur sont descendus, l'information est recueillie à la tête du puits. Elle est mise en corrélation avec la profondeur du puits, ce qui permet aux ingénieurs ou aux hydrologues de la société pétrolière qui fore le puits d'en estimer le contenu en pétrole ou en eau, donc les réserves de ces liquides.

FIGURE 8.10
DIAGRAPHIE D'UN PUITS À L'AIDE D'UNE SOURCE DE NEUTRONS



Stérilisation des produits médicaux

Depuis plus d'un siècle, nous savons à quel point est essentielle la stérilisation des instruments médicaux. Les travaux de Lord Joseph Lister l'ont confirmé : la stérilisation réduit le nombre de cas d'infections postopératoires. Une fois que la théorie des germes se fut imposée, diverses méthodes de stérilisation ont été mises au point : utilisation de produits chimiques, stérilisation par la vapeur, chaleur sèche.

La stérilisation par irradiation a été introduite dans le commerce en Écosse en 1957. La technique est à plusieurs égards supérieure aux anciennes techniques traditionnelles. Par exemple, une exposition prolongée à des températures élevées peut détruire ou endommager certains plastiques. L'exposition à la vapeur peut dissoudre certaines substances.

La stérilisation par irradiation est simple en principe. Le matériel ou les produits médicaux sont exposés à de très fortes doses de rayonnement gamma, de rayons X ou d'électrons très énergétiques. L'utilisation des rayons gamma du cobalt 60 est maintenant très répandue, et une dose d'environ 10 kGy garantit la stérilité d'un produit autant que les autres méthodes. Comme les rayons gamma sont pénétrants, il est possible de mettre à l'avance des produits comme le matériel hypodermique, les tubes et le fil à suture sous un emballage de plastique ou de papier métallique, et de les stériliser par la suite. Le procédé est particulièrement utile pour le fil résorbable qui est très difficile à stériliser par d'autres techniques.

Conservation des aliments par irradiation

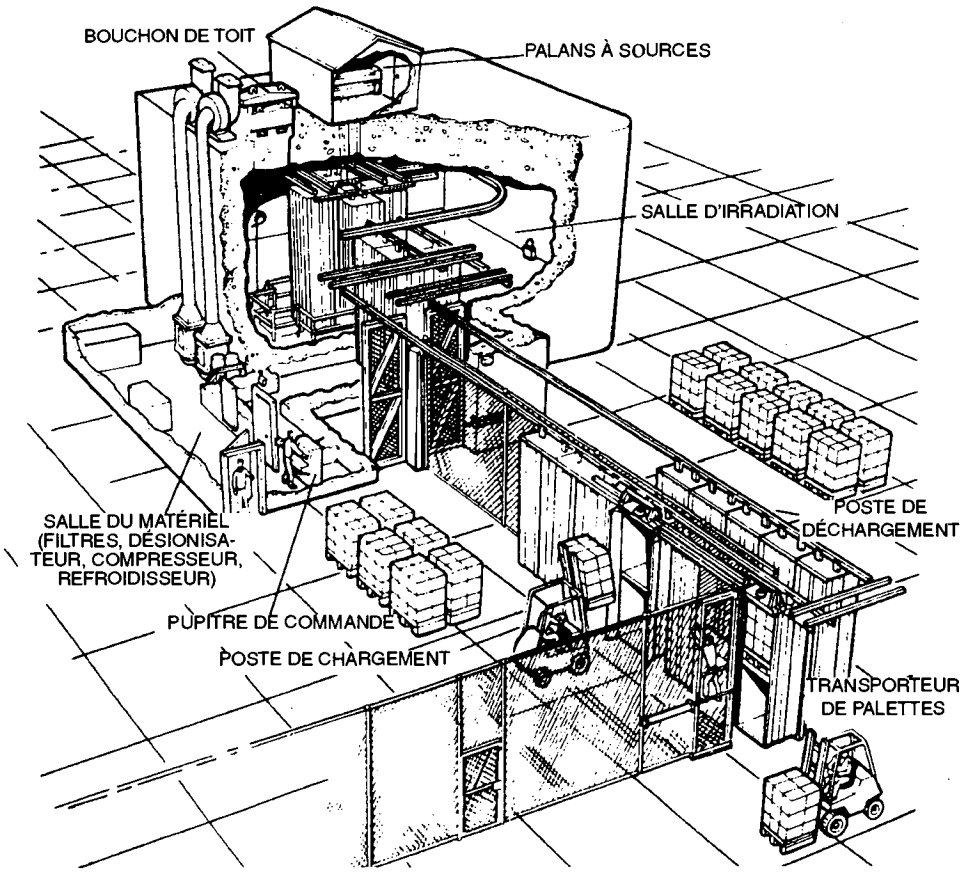
La conservation des aliments est une autre technologie qui se développe rapidement. Elle exploite la capacité des rayonnements ionisants de détruire, en doses massives, des organismes vivants. Les infections transmises par les aliments sont une source de graves problèmes de santé dans presque toutes les parties du monde, surtout les pays du Tiers Monde. Même les populations de pays industrialisés peuvent être infectées, surtout par des aliments d'origine animale contenant des agents comme la salmonelle. Cela entraîne pour la société des coûts élevés.

Encore une fois, le principe est simple et a été vérifié pour la première fois en 1916, en Suède, au moyen de rayons X. Les aliments sont exposés à des doses élevées de 5 à 10 kGy qui sont suffisantes pour éliminer les agents contaminants. Cette technique présente des avantages sur les méthodes classiques. Les doses utilisées ne sont ni toxiques ni mutagènes, altèrent peu la fraîcheur et le goût de la plupart des aliments, permettent de conserver les aliments déjà emballés et améliorent grandement la qualité de conservation. Comme les doses élevées de rayonnement peuvent altérer le goût de

certains aliments, le dosage doit être choisi avec soin pour chaque aliment. Une grande diversité d'aliments a été traitée de cette façon. Nordion International Inc. du Canada a effectué une recherche dans le domaine qui a vite révélé que les pommes de terre irradiées étaient beaucoup plus faciles à conserver que les pommes de terre non irradiées. Des études ont montré que cette méthode de conservation éliminait efficacement les agents infectieux dans diverses catégories de viande, de poisson, de légumes et de fruits.

Un irradiateur d'aliments type comprend une source de rayonnement avec blindage, un convoyeur automatique pour déplacer les matières dans la salle d'irradiation, les salles de prétraitement

FIGURE 8.11
IRRADIATEUR D'ALIMENTS



(refroidissement ou congélation avant l'irradiation) et les salles d'emballage et d'entreposage. La figure 8.11 montre un irradiateur conçu par Nordion International Inc. pour irradier des palettes d'aliments.

L'irradiation des aliments à des fins de conservation a mis du temps à se répandre. Plusieurs questions ont suscité de l'inquiétude. On a d'abord craint que les aliments deviennent radioactifs, ce qui n'est pas le cas si l'énergie des rayons gamma utilisés est inférieure à 10 MeV. Puis on a craint que le procédé produise des toxines dangereuses dans les aliments. Aucun des composés produits lorsque les rayonnements ionisants ont réagi avec les molécules des aliments n'a rendu les aliments toxiques. Plusieurs organismes, dont l'Organisation mondiale de la santé, approuvent entièrement l'irradiation des aliments lorsqu'elle est réalisée dans les conditions prescrites.

Des entreprises néerlandaises, norvégiennes, françaises, belges, japonaises, sud-africaines et américaines ont adopté l'irradiation des aliments à l'échelle commerciale. Le cobalt 60, qui au Canada provient surtout des centrales nucléaires d'Ontario Hydro, est utilisé dans de nombreux irradiateurs partout dans le monde.

LUTTE CONTRE LES INSECTES NUISIBLES

La technique de la stérilisation des insectes s'est avérée au cours des dernières années une méthode prometteuse pour lutter contre les insectes nuisibles. Mise au point aux États-Unis au début des années 50, elle s'est avérée efficace pour l'éradication de la mouche bleue de la viande dans l'île de Curaçao. Cette mouche, qui est à peu près deux fois plus grosse que la mouche domestique, s'attaque aux animaux vivants et dépose ses œufs dans les plaies ouvertes telles les égratignures faites au contact de fils barbelés. Lorsque les œufs éclosent, les larves envahissent la blessure et se nourrissent de la chair de l'animal. Plus la plaie est grande, plus il y a de mouches qui s'y fixent. Une fois très infesté par les larves de cette mouche, l'animal devient malade et finit souvent par mourir. La mouche bleue de la viande a causé des pertes énormes aux éleveurs du sud des États-Unis. La technique de la stérilisation des insectes a été mise au point pour lutter contre cette mouche. Le principe est simple. Un grand nombre de mouches sont élevées en captivité, et les nymphes sont exposées à des rayons gamma d'environ 100 Gy. Cela ne les empêche pas de se transformer en mouches actives, mais les rend stériles. Après la nymphose, des milliards de mouches envahissent les zones infestées. Les mâles stériles submergent les mâles naturels et rivalisent avec eux pour s'accoupler avec les femelles naturelles. Les femelles ne s'accouplent qu'une fois et, si leur partenaire est stérile, pondent des œufs qui n'éclosent pas.

Le succès de cette technique dans la lutte contre un insecte nuisible dépend de deux facteurs :

- il faut pouvoir élever l'insecte en grands nombres, en captivité, et
- les femelles ne doivent s'accoupler qu'une fois.

La mouche bleue de la viande répond aux deux conditions.

Le programme d'éradication de la mouche bleue de la viande a été remarquablement efficace et a permis d'éliminer l'insecte aux États-Unis et dans le nord du Mexique. Plus récemment, la technique a été appliquée avec succès pour enrayer une infestation de mouches bleues de la viande en Libye. La mouche aurait été introduite par du bétail contaminé et constituait une menace énorme pour les animaux d'Afrique.

Malheureusement, la technique ne convient pas à tous les insectes nuisibles parce qu'il faut pouvoir les élever en captivité et il faut que la femelle ne s'accouple qu'une fois. Mais elle a tout de même permis d'éliminer la mouche du melon dans l'île de Rota et de décimer la mouche des fruits au Costa Rica et en Tunisie.

La technique de la stérilisation des insectes est à l'essai sur d'autres insectes : la mouche tsé-tsé, la mouche des cerises, la mouche de l'olive et la mouche de l'oignon. Tous ces insectes nuisibles causent d'énormes pertes commerciales aux agriculteurs. Une lutte efficace contre la mouche tsé-tsé contribuerait grandement à améliorer l'économie de nombreux pays africains. Des projets pilotes ont été réalisés avec succès au Nigéria et au Burkina Faso.

Le Canada, en tant que grand fournisseur de cobalt 60 pour la stérilisation par irradiation de ces insectes, joue un rôle important dans ces projets.

DÉTECTEURS DE FUMÉE

Le Canada se classe parmi les premiers pays occidentaux où les décès par le feu sont les plus nombreux chaque année (figure 8.12), de sorte que tout dispositif permettant de réduire ce risque est important en sécurité-incendie. Le détecteur de fumée est devenu un dispositif si efficace pour sauver des vies que certaines municipalités canadiennes en exigent l'installation dans tous les nouveaux foyers.

Il existe un type de détecteur de fumée dans lequel on exploite une source radioactive et les propriétés des rayonnements ionisants. Ce détecteur, appelé détecteur de fumée à chambre d'ionisation, se retrouve dans de nombreux foyers parce qu'il est très fiable, se vend bon marché et est peu coûteux d'entretien.

Le principe de fonctionnement de ce type de détecteur repose sur la capacité des rayonnements ionisants d'interagir avec les atomes ou les molécules d'un

gaz, et de libérer des électrons. Si cela se produit dans un espace confiné, par exemple entre deux plaques de métal, et qu'une tension est appliquée aux bornes des plaques (c'est ce qu'on appelle une *chambre d'ionisation*), les électrons sont recueillis sur la plaque positive, produisant un faible courant électrique (figure 8.13).

Lorsque l'espace entre les plaques est rempli d'un gaz dont les propriétés diffèrent de celles de l'air, l'intensité du courant électrique varie : elle est plus faible ou plus élevée. La fumée et les autres gaz dégagés par le feu diminuent grandement l'intensité du courant dans un tel dispositif. Un détecteur de fumée à chambres d'ionisation comprend deux chambres d'ionisation d'égal volume qui partagent la même source radioactive de particules alpha (figue 8.14). Une des chambres contient de l'air pur, l'autre est ouverte pour admettre l'air ambiant. Une tension est appliquée aux bornes des chambres d'ionisation. Lorsque les chambres contiennent de l'air propre, les courants des deux chambres sont égaux. Lorsque de la fumée et des gaz de combustion entrent dans la chambre ouverte, le courant dans cette chambre diminue. Un détecteur très sensible à cette fluctuation de courant déclenche un avertisseur sonore. On estime que si tous les foyers étaient munis de dispositifs d'avertissement de ce genre, le nombre de décès par le feu pourrait chuter de 40 à 50 %.

FIGURE 8.12
DÉCÈS PAR LE FEU DANS DIVERS PAYS

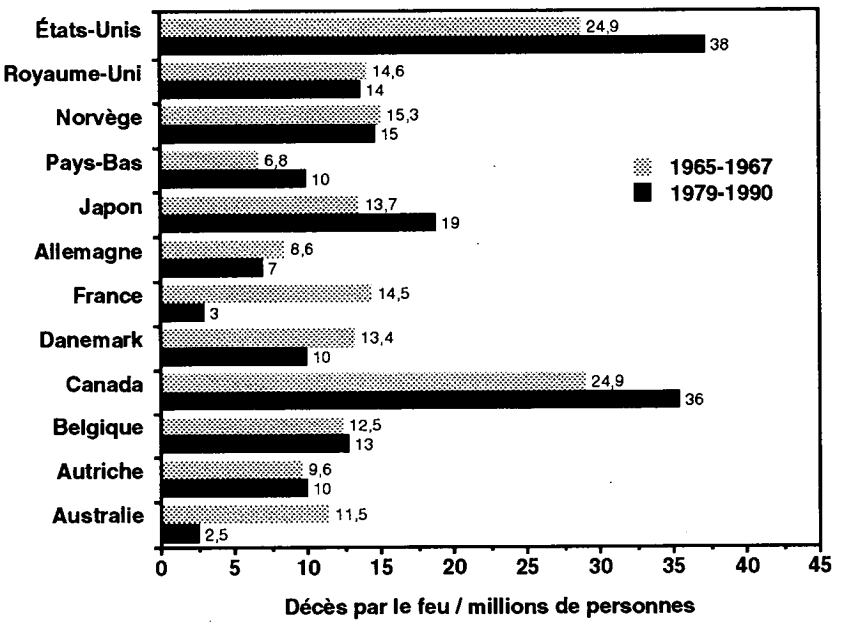


FIGURE 8.13
LE RAYONNEMENT PRODUIT UN COURANT ÉLECTRIQUE DANS UNE CHAMBRE D'IONISATION

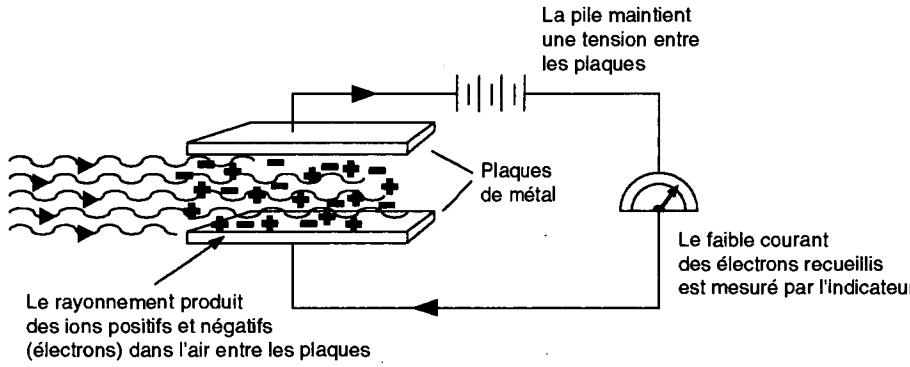
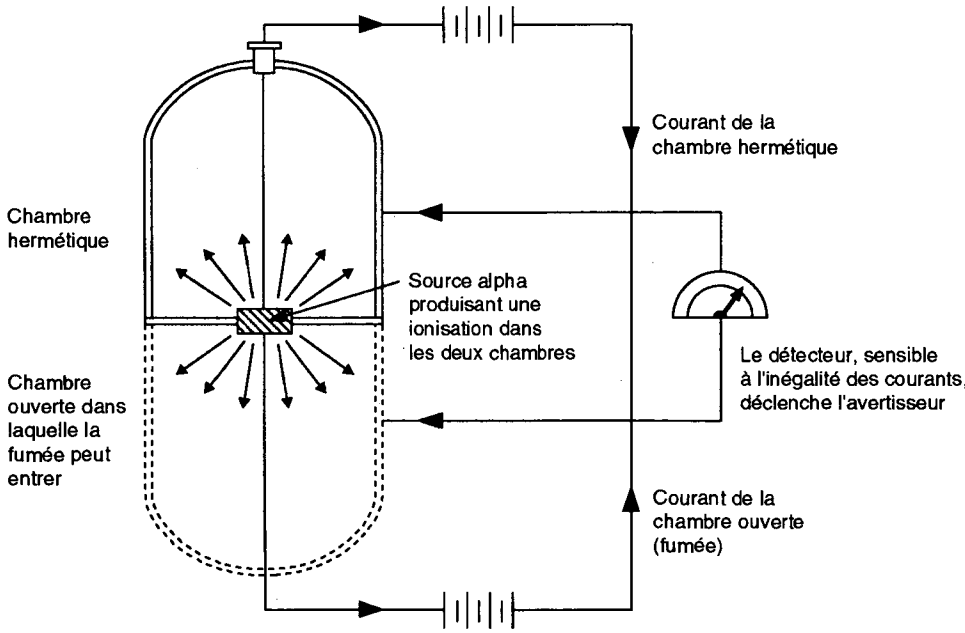


FIGURE 8.14
DÉTECTEUR DE FUMÉE À CHAMBRES D'IONISATION



TECHNIQUE DES TRACEURS RADIOACTIFS

La *technique des traceurs* consiste à injecter un produit chimique dans un processus ou un système et à suivre son cheminement dans le système pour comprendre ce qu'il advient du produit et comprendre le système. Les traceurs radioactifs sont très utiles dans cette technique parce qu'ils sont faciles à détecter et à mesurer en très faibles concentrations.

Il n'est pas nécessaire que le traceur radioactif soit un produit de fabrication; de nombreuses études parmi les plus concluantes, surtout celles portant sur l'environnement et la pollution, font intervenir des traceurs naturels. La technique des traceurs radioactifs a permis d'étudier la contamination des eaux souterraines, la circulation océanique, les taux de sédimentation et le comportement de l'atmosphère.

AUTRES UTILISATIONS

Les radionucléides ont de nombreuses autres utilisations, comme l'alimentation des lampes d'urgence (certaines utilisent le tritium produit par les réacteurs CANDU) ou l'élimination de l'électricité statique. On utilise aussi des sources radioactives à diverses fins dans les instruments scientifiques et les indicateurs de point de rosée. Il existe également de nombreuses applications particulières en recherche scientifique.

CHAPITRE 9

L'EXPOSITION PROFESSIONNELLE

Il existe de nombreux métiers qui comportent une exposition aux rayonnements ionisants. Environ un travailleur canadien sur 100 appartient à la catégorie des personnes exposées aux rayonnements dans le cadre de leur travail (travailleurs sous rayonnements). Les exemples les plus manifestes sont les personnes engagées dans la production ou l'utilisation de rayonnements ou de substances radioactives, par exemple les radiologues industriels, les employés des centrales nucléaires et les employés des hôpitaux qui utilisent des appareils de radiographie et de radiothérapie dans le traitement du cancer.

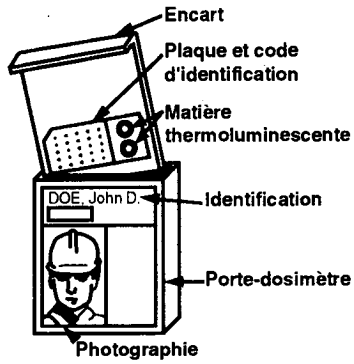
Dans certains métiers, les travailleurs sont exposés à des sources naturelles de rayonnement ionisant. Bon nombre de mineurs sont exposés aux faibles quantités d'uranium, de thorium et de potassium 40 présentes dans divers types de roches. L'exposition provient de deux sources, les rayons gamma et les produits de désintégration du radon. Les rayons gamma sont émis par le potassium 40 et les nombreux radionucléides de la chaîne naturelle de désintégration de l'uranium et du thorium. Les produits de désintégration du radon proviennent surtout du radon 222 issu de la chaîne de désintégration de l'uranium 238. Ce gaz se diffuse dans la mine à partir des parois et des minerais broyés. En lui-même, le radon 222 est comparativement inoffensif, mais il se désintègre très rapidement en radionucléides émetteurs de particules alpha qui se lient aux particules de poussières dans l'air ambiant de la mine. L'inhalation de ces particules entraîne l'irradiation des poumons. Il est plutôt surprenant de constater que dans certains métiers, les doses de rayonnement naturel reçues sont relativement élevées. À titre d'exemple, les travailleurs qui fabriquent des engrais à base de potasse sont exposés à l'uranium, au thorium et au potassium 40 présents à l'état naturel dans les minerais de potasse. De même, les membres d'équipage des avions volant à haute altitude, c'est-à-dire autour de 10 000 m, sont exposés à des doses élevées de rayonnement cosmique.

FICHIER NATIONAL DE DOSIMÉTRIE

Les travailleurs canadiens qui sont professionnellement exposés aux rayonnements ionisants par l'intermédiaire

des substances radioactives ou des rayons X peuvent être tenus de porter un instrument (dosimètre) permettant de mesurer la dose de rayonnement qu'ils reçoivent dans l'exercice de leurs fonctions (figure 9.1). La fourniture et la lecture des dosimètres sont confiées à un service certifié de dosimétrie.

FIGURE 9.1
DOSIMÈTRE THERMOLUMINESCENT



Les données sur les doses d'irradiation professionnelle, quelle que soit la personne ou l'organisme qui effectue la mesure, sont conservées dans le Fichier national de dosimétrie géré par Santé Canada. On mesure les doses d'irradiation professionnelle et on conserve les données recueillies pour trois raisons principales :

- pour montrer que l'on s'est conformé aux limites de dose réglementaires et permettre de vérifier si les doses reçues sont aussi faibles que possible;
- pour fournir de l'information aux commissions des accidents du travail relativement aux demandes d'indemnités; et
- pour constituer une base de données susceptible d'aider à mieux estimer le risque lié à l'exposition aux rayonnements ionisants.

Au Canada, il est rare que les travailleurs sous rayonnements dépassent la limite de dose annuelle. Il existe environ 110 000 travailleurs dont l'exposition aux rayonnements est surveillée de façon régulière. De ce nombre, moins d'une personne sur 10 000 dépasse la limite de dose annuelle de 50 mSv actuellement en vigueur, au cours d'une année moyenne.

Santé Canada publie un rapport annuel sur les doses de rayonnement reçues par exposition professionnelle en fonction de la catégorie d'emploi.

Dans les années 70, les doses annuelles moyennes les plus élevées se trouvaient chez les employés des centrales nucléaires; les doses pour cette catégorie de travailleurs sont beaucoup plus faibles aujourd'hui (figure 9.2). Cette réduction est attribuable à une amélioration des procédés de conception et d'exploitation. Actuellement, ce sont les radiologues industriels qui reçoivent la dose annuelle moyenne la plus élevée et chez qui l'on retrouve la plus forte incidence de dépassement des limites de dose d'exposition professionnelle.

Les doses moyennes reçues par l'ensemble des travailleurs d'une industrie donnée nous indiquent si cette industrie contrôle bien les

doses de rayonnement reçues par son personnel. Mais comment cette dose est-elle distribuée ? Un grand nombre de travailleurs reçoit-il de faibles doses et un autre grand groupe reçoit-il des doses élevées ?

La distribution des doses totales reçues au cours de la période de cinq ans commençant en 1986 et se terminant en 1990 par tous les travailleurs exposés professionnellement dans toutes les centrales nucléaires canadiennes est illustrée dans la figure 9.3. La dose annuelle moyenne reçue par le groupe de travailleurs le plus exposé au cours de cette période de cinq ans ne dépassait pas 12 mSv.

DOSES ANNUELLES MOYENNES* SELON DIVERS MÉTIERS, CANADA 1991

MÉTIER	DOSE (MSV)
Dentiste	0,31
Médecin	0,73
Infirmière	0,40
Vétérinaire	0,42
Technicien en isotopes	1,86
Radiologue industriel	5,28
Préposé au combustible nucléaire	3,38
Exploitant de réacteur	2,62
Préposé à l'entretien mécanique du réacteur	3,47
Mineur d'uranium	
Rayons gamma	1,79
Radon	1,03 WLM

* La moyenne des doses ≥ 0,2 mSv et 0,2 WLM

FIGURE 9.2
DOSE MOYENNE AU CORPS ENTIER SELON L'ANNÉE
(CATÉGORIES D'EMPLOI CHOISIES)

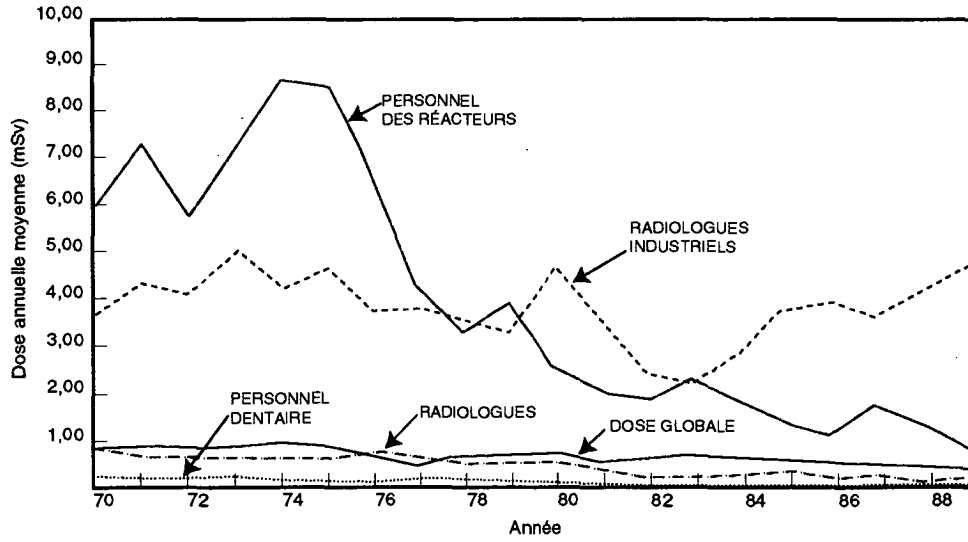
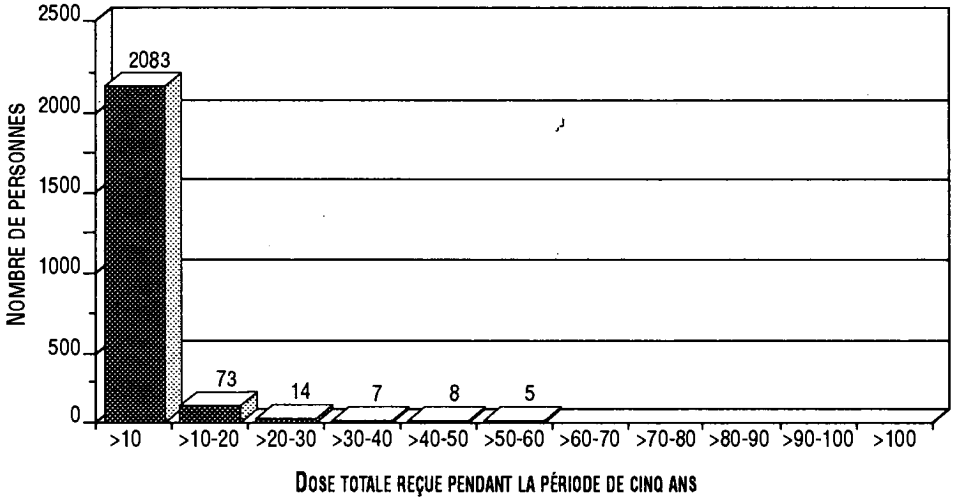


FIGURE 9.3
DISTRIBUTION SUR CINQ ANS DE LA DOSE REÇUE PAR LES TRAVAILLEURS DES CENTRALES NUCLÉAIRES CANADIENNES
1986-1990



LES MINEURS D'URANIUM

L'extraction de l'uranium se pratique au Canada depuis les années 30. À cette époque, on s'intéressait au minerai d'uranium en raison de son contenu en radium, lequel était utilisé en médecine; cependant, depuis la Seconde Guerre mondiale, le radium a été remplacé dans le traitement du cancer par des radionucléides artificiels, de sorte qu'aujourd'hui, l'extraction vise uniquement l'uranium.

Les mineurs d'uranium sont exposés aux rayons gamma émis par le minerai ainsi qu'aux produits de désintégration du radon présents dans l'air de la mine. Dans les débuts de l'extraction de l'uranium, on avait créé une unité pour mesurer l'exposition aux produits de désintégration du radon présents dans l'air. La mesure était nommée *niveau opérationnel* et la première limite annuelle d'exposition à ce contaminant atmosphérique du milieu de travail avait été fixée à 12 *niveaux opérationnels-mois (WLM)*. La dose pouvait être reçue par une exposition de six mois à 2 niveaux opérationnels, par une exposition de quatre mois à 3 niveaux opérationnels et ainsi de suite. Une fois que les effets tardifs de l'exposition aux produits de désintégration du radon ont été mieux connus, la limite annuelle a été abaissée à 4 WLM, c'est-à-dire la limite réglementaire actuellement en vigueur.

Un WLM est aujourd'hui défini comme une exposition de 170 heures à un niveau opérationnel et est jugé équivalent à une exposition externe du corps entier à environ 5 mSv de rayons gamma. Un niveau opérationnel est défini comme la quantité de produits de

désintégration du radon présente dans un litre d'air et qui peut émettre $1,6 \times 10^{-13}$ joule ($1,3 \times 10^{5}$ MeV) de rayonnement alpha. L'exposition des mineurs aux rayons gamma et aux produits de désintégration du radon a été relativement constante au cours des dix dernières années.

LES DOSES ANNUELLES MOYENNES DES MINEURS AUTRES QUE LES MINEURS D'URANIUM

Mise à part le secteur de l'uranium, l'extraction minière n'est pas généralement considérée comme un milieu professionnel d'exposition aux rayonnements, de sorte qu'au Canada, les mineurs autres que les mineurs d'uranium ne sont pas tenus de porter un dosimètre. En conséquence, il n'existe que peu de données sur les doses de rayonnement reçues par ces mineurs canadiens; toutefois, le National Radiological Protection Board du Royaume-Uni dispose de certaines données sur les autres mineurs. La plupart des mines de charbon du Royaume-Uni étant bien ventilées, les mineurs sont exposés à des concentrations relativement faibles de produits de désintégration du radon. On estime à 0,6 mSv la dose annuelle attribuable au radon et aux sources externes de rayons gamma. Dans les mines d'étain et de fluorite, la concentration de radon est considérablement plus élevée et la dose moyenne reçue dans ces mines est de 7 mSv environ. Cette dernière dose est de beaucoup supérieure à la dose moyenne reçue par les employés des centrales nucléaires ou par les techniciens en radiographie médicale au Canada.

EXPOSITION PROFESSIONNELLE DU PERSONNEL NAVIGANT

Les passagers et les membres d'équipage des avions volant à haute altitude sont exposés à des concentrations élevées de rayonnement cosmique. Pendant un vol entre Montréal et Fredericton, la dose additionnelle de rayonnement se situe à environ 0,0005 mSv et le débit de dose maximal est environ 20 fois le débit au sol à Montréal. Aux États-Unis, on a estimé qu'en 1980, la dose annuelle moyenne reçue par quelque 70 000 membres d'équipage des avions subsoniques de transport de passagers, qui volent à environ 8 km d'altitude, se situait entre 1 et 2 mSv. La dose collective reçue par ce groupe de travailleurs se chiffre donc à 100 sieverts•personnes. Malgré l'absence de données canadiennes, il est probable que la dose individuelle de rayonnement reçue par le personnel navigant canadien soit semblable à celle de ses homologues américains. Le personnel navigant canadien étant beaucoup moins nombreux, proportionnellement à la population du pays, il devrait absorber une dose collective dix fois inférieure à la dose individuelle américaine, c'est-à-dire environ 10 sieverts•personnes. Les données du rapport de 1988 du Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR) laissent croire que la dose

serait quelque peu inférieure à cette valeur; dans ce rapport, on indique une valeur de 1 mSv pour le personnel navigant qui effectue 600 heures de vol par année à une altitude de 8 km.

Les données recueillies au Royaume-Uni concordent avec celles des États-Unis. La dose individuelle mesurée par le National Radiological Protection Board du Royaume-Uni correspond à une dose annuelle d'environ 2 mSv pour les membres d'équipage des avions subsoniques de transport de passagers et à une dose collective de 40 sieverts•personnes. Le personnel navigant de l'avion supersonique Concorde absorbe une dose annuelle moyenne individuelle plus élevée. Cela s'explique par le fait que le Concorde vole à une altitude considérablement plus élevée que les avions subsoniques et que le débit de dose du rayonnement cosmique est beaucoup plus important. La dose annuelle moyenne reçue par les membres d'équipage du Concorde se situe à environ 2,5 mSv, la dose maximale allant jusqu'à 15 mSv. Le débit de dose du rayonnement cosmique dépend fortement des éruptions solaires. Pendant une éruption solaire, à l'altitude atteinte par le Concorde au cours d'un vol transatlantique (19 km), la dose de rayonnement cosmique peut augmenter 10 000 fois. Des détecteurs installés sur le Concorde avertissent les pilotes si le débit de dose dépasse 0,5 mSv par heure, de manière qu'ils puissent réduire l'altitude et mettre à profit l'effet d'écran de l'atmosphère.

EXPOSITION DES ASTRONAUTES

Le rayonnement cosmique constitue également une source d'exposition pour les astronautes, surtout lorsqu'ils travaillent à l'extérieur du vaisseau spatial. Des données recueillies en 1988 par le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants indiquent que la dose reçue par les astronautes américains était de l'ordre de 0,5 à 5 mSv par mission. Dans certains vols prolongés effectués par les astronautes de l'ancienne Union soviétique, par exemple la mission IV de Salut-6 qui a duré 175 jours, la dose reçue était de 55 mSv. Il est possible que l'exposition au rayonnement cosmique soit un facteur qui limite la durée des voyages spatiaux.

DOSES ANNUELLES DE RAYONNEMENT NATUREL RÉSULTANT D'UNE EXPOSITION PROFESSIONNELLE

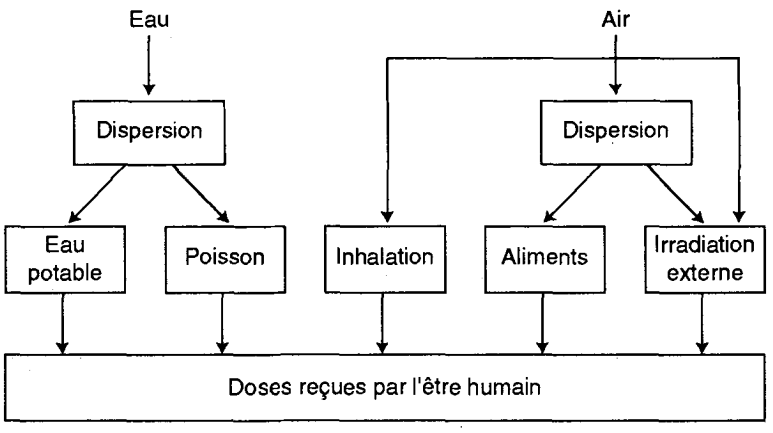
	Dose moyenne individuelle (mSv)	Dose collective (Sv•personnes)
Personnel navigant (É.-U., 1980)	1-2	100
Personnel navigant (R.-U., 1987)	2 (subsonique) 2,5 (supersonique)	40 -
Mineurs de charbon (R.-U., 1987)	1,2	96
Autres mineurs (R.-U., 1987)	14	28
Mineurs d'uranium (Canada, 1991)	4,5	9

CHAPITRE 10

LE RAYONNEMENT DANS L'ENVIRONNEMENT

La radioactivité présente dans l'environnement est en partie d'origine naturelle et en partie due aux activités humaines. Cette seconde source de radioactivité comprend les radionucléides qui sont largement utilisés en médecine et dans l'industrie, mais aussi les retombées produites par les essais d'armes nucléaires effectués dans l'atmosphère, les substances rejetées au cours d'explosions nucléaires souterraines, les substances rejetées en conditions d'accident et en conditions d'exploitation normale à partir d'installations nucléaires, et enfin les substances rejetées dans la gestion des déchets radioactifs. Quelle que soit son origine, la radioactivité présente dans l'environnement conduit à l'exposition de l'être humain suivant une ou plusieurs voies (figure 10.1), notamment par irradiation externe, due à des radionucléides contenus dans l'air et déposés au sol, et par irradiation interne, due à l'inhalation de radionucléides en suspension dans l'air et à l'ingestion de radionucléides contenus dans les aliments ou dans l'eau.

FIGURE 10.1
PRINCIPALES VOIES D'EXPOSITION APRÈS UN REJET DE RADIONUCLÉIDES DANS L'ENVIRONNEMENT



Lorsque des radionucléides entrent dans le sol ou dans l'eau à un taux constant pendant des périodes suffisamment longues, on finit par atteindre un état où le taux d'addition de radionucléides est égal au taux d'élimination de ceux-ci, soit par désintégration, soit par transfert à une autre zone. Les concentrations restent alors constantes, et l'état créé constitue ce qu'on appelle un «régime permanent». Étant donné que la concentration reste constante, le débit de dose reste aussi constant. Il est commode d'exprimer ce débit sous forme d'une dose annuelle, comme on l'a fait pour les sources naturelles au chapitre 6.

Toutefois, dans de nombreux cas, les rejets ne sont pas produits de cette façon. Ils sont plutôt produits sous forme d'impulsions courtes uniques. Dans de telles conditions, les concentrations dans les éléments touchés de l'environnement varient en fonction du temps, et il en va de même pour les débits de dose résultants. Dans un premier temps, après un rejet unique de courte durée dans l'environnement, il se produit une augmentation jusqu'à une concentration de crête, suivie d'une diminution jusqu'à ce que la concentration revienne finalement à son niveau original. Le taux de diminution varie selon les radionucléides rejetés et selon leur comportement dans l'environnement. Il est impossible de spécifier une dose annuelle car la valeur varie d'une année à l'autre. On obtient une meilleure indication de l'impact de ce type de source en additionnant les doses de chaque année, depuis la première observation de la radioactivité dans l'environnement jusqu'à sa disparition. La somme obtenue est appelée la «dose engagée» : une fois qu'il pénètre dans l'environnement, un radionucléide «engage» les personnes et parfois les générations ultérieures à recevoir une dose. Le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR) utilise la dose engagée pour décrire les impacts de diverses activités nucléaires.

RETOMBÉES DUES AUX ESSAIS D'ARMES NUCLÉAIRES

En raison des essais d'armes nucléaires effectués dans l'atmosphère, des substances radioactives ont été rejetées dans la stratosphère, d'où elles sont lentement passées à l'atmosphère inférieure ou troposphère. La plus grande partie de ces résidus d'essais ont été rejetés entre 1950 et 1963, année de l'entrée en vigueur du *Traité sur l'interdiction partielle des essais nucléaires*. Depuis, seulement quelques essais à petite échelle ont été effectués.

La plus grande partie de ces substances radioactives rejetées dans l'atmosphère sont aujourd'hui déposées au sol. De nombreux radionucléides différents sont produits dans une explosion nucléaire, mais l'activité de la plupart décroît rapidement, de sorte qu'après une courte période initiale au cours de laquelle ils contribuent à l'exposition externe, ils ne présentent plus de

danger pour les personnes ni pour les autres être vivants. À long terme, seulement trois radionucléides, le carbone 14, le strontium 90 et le césium 137, produisent des doses appréciables, sous forme d'irradiation interne, par l'intermédiaire des aliments. La plus grande partie des doses prévues à partir du strontium 90 et du césium 137 ont déjà été produites, de sorte qu'il ne reste que le carbone 14 comme source principale de dose de rayonnement. La dose moyenne actuelle attribuable aux essais d'armes est d'environ 0,005 mSv par année, soit environ un trentième de la dose correspondante en 1963.

D'après le comité UNSCEAR, la dose engagée par personne, résultant des essais d'armes nucléaires déjà effectués dans l'atmosphère, pour la zone tempérée de l'hémisphère nord, s'élève à 4,5 mSv. Cette dose engagée est la moyenne pour la zone comprise entre 20° et 60° de latitude nord, et elle représente approximativement la dose que recevront, au cours de toute leur vie, les personnes vivant à ces latitudes au Canada pendant plusieurs centaines d'années à venir. Cependant, plus au nord, la chaîne alimentaire lichen→caribou→être humain produit des doses un peu plus élevées.

ACCIDENT NUCLÉAIRE DE TCHERNOBYL

Le 26 avril 1986, une pointe de puissance dans un réacteur de la centrale nucléaire de Tchernobyl, en Ukraine, a provoqué une explosion et un incendie qui ont entraîné le rejet de grandes quantités de radionucléides dans l'atmosphère pendant les dix jours qui ont suivi. Les effets les plus importants ont été ressentis localement et dans l'Europe de l'Est. La population vivant dans un rayon de 30 km de la centrale, soit quelque 90 000 personnes, a été évacuée. Cette zone est contaminée par des produits de fission provenant du réacteur, et, aujourd'hui encore, on considère qu'elle n'offre pas des conditions normales d'habitation pour l'être humain.

Le nuage radioactif a été transporté par les courants d'air dans les directions est et ouest. Il a atteint la côte est du Canada le 6 mai et la côte ouest, le 7 mai. Des substances radioactives ont été détectées dans la pluie, à Ottawa, le 7 mai et dans l'air, le 8 mai. Les principaux radionucléides contenus dans le nuage qui a fini par s'étendre à la grandeur du Canada étaient l'iode 131, le césium 137, le césium 134 et le ruthénium 103, mais seuls le césium 137 et l'iode 131 ont contribué de façon appréciable aux doses. Les plus hautes concentrations dans l'air ont été observées le 10 mai, et à la fin de juin, les niveaux d'activité étaient revenus à la normale. Pour les mois de mai et juin, Santé Canada a estimé que la dose totale par personne s'élevait à 0,00028 mSv, dont la moitié environ était due au rayonnement externe produit par des radionucléides déposés. Cette dose est beaucoup plus faible que la dose produite par le rayonnement

naturel et que les doses correspondantes observées au Japon, aux États-Unis et dans de nombreux pays d'Europe à la suite du même accident.

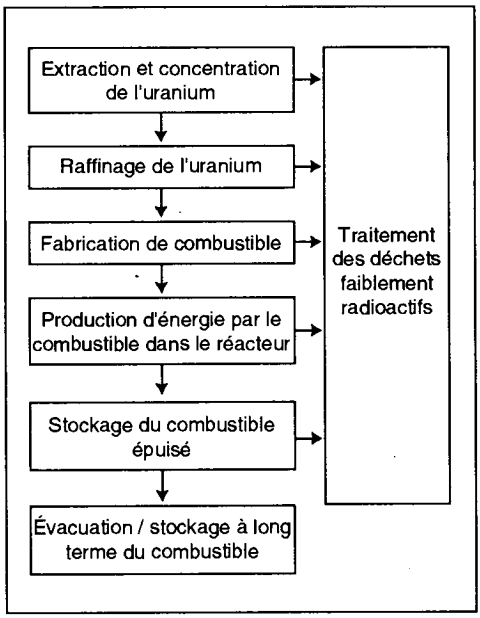
REJETS DE RADIONUCLÉIDES DANS L'ENVIRONNEMENT

Les radionucléides rejetés dans l'environnement proviennent d'une grande variété de sources, notamment des installations associées au cycle du combustible nucléaire, des établissements militaires, des organismes de recherche, des hôpitaux et des industries non nucléaires. Les limites de rejet pour les installations nucléaires doivent être approuvées par des autorités fédérales et provinciales compétentes. On s'assure que les limites autorisées sont respectées en surveillant les effluents et, s'il y a lieu, d'autres éléments de l'environnement.

La plus grande partie des substances radioactives qui pénètrent aujourd'hui dans l'environnement en raison des activités humaines sont produites par l'industrie nucléaire. L'air, l'eau de sol et les légumes au voisinage des centrales nucléaires canadiennes sont surveillés par le service public d'électricité, par Santé Canada et par les autorités provinciales.

L'industrie nucléaire peut être divisée en opérations ou étapes, allant de l'extraction du minerai d'uranium à l'évacuation finale, dans un dépôt approprié, du combustible épuisé et d'autres déchets radioactifs (figure 10.2).

FIGURE 10.2
PRODUCTION ET UTILISATION DE COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE/GESTION DES DÉCHETS



Chaque étape du cycle du combustible produit son propre type de rejet. Les déchets produits par les opérations d'extraction et de concentration contiennent surtout des isotopes d'uranium, de thorium et de radium dans de la roche pulvérisée en suspension dans l'eau. Les tas de «résidus» produits deviennent des sources de radon, de thoron et de leurs produits solides de désintégration en suspension dans l'air, comme on l'a décrit au chapitre 6. Les raffineries et les usines de fabrication de combustible rejettent principalement des isotopes d'uranium et de thorium. Les réacteurs nucléaires rejettent des radio-isotopes de gaz rares, du tritium et du carbone 14 dans l'atmosphère; ils rejettent du césium 134, du césium 137 et du cobalt 60 dans l'eau. La méthode actuelle qui

consiste à conserver des grappes complètes de combustible épuisé, soit en les submergeant dans des piscines de stockage, soit en les entreposant à sec dans des silos en béton (figure 13.2), produit très peu de rejets de substances radioactives, en raison des barrières de confinement multiples utilisées. Aucun combustible épuisé n'est évacué au Canada ni dans quelque autre pays occidental. Beaucoup de travaux de recherche sont effectués au Canada et à l'étranger pour trouver des méthodes adéquates d'évacuation ou d'élimination permanente du combustible épuisé. Il faudra probablement quelques décennies avant qu'on puisse faire la démonstration satisfaisante d'une méthode sûre.

Dans la plupart des pays autres que le Canada, une étape d'enrichissement du combustible est ajoutée avant la production d'éléments combustibles afin de porter la proportion d'uranium 235 au-dessus de sa proportion dans l'uranium naturel. L'uranium 235 est l'isotope d'uranium qui fissionne facilement (voir le chapitre 11). Dans le système CANDU, cette étape d'enrichissement n'est pas requise.

En plus, dans certains de ces pays, le combustible, après avoir été retiré du réacteur, est soumis à un traitement chimique permettant de recycler l'uranium 235 et le plutonium non utilisés qui ont été produits dans le combustible. Cette étape visant à récupérer le plutonium fissile pourrait être utile à un certain moment dans le futur, mais elle n'est pas nécessaire dans le système CANDU pour l'instant. Dans le combustible à la sortie d'un réacteur CANDU, la quantité d'uranium 235 par kilogramme d'uranium total est inférieure à celle qui est rejetée dans le flux de déchets d'une usine de retraitement type.

ÉVACUATION ET GESTION DES DÉCHETS

L'industrie nucléaire produit la plus grande partie, mais pas la totalité, des déchets radioactifs au Canada. Une partie provient des laboratoires qui traitent des radionucléides destinés au secteur médical, à l'industrie et au secteur de la recherche, où leur utilisation produit d'autres déchets. Les opérations de gestion des déchets sont effectuées de façon à protéger le public et à réduire au minimum les doses reçues par les travailleurs. Différentes techniques sont utilisées, selon le niveau d'activité, la concentration, l'intensité des champs de rayonnement externe associés et le temps nécessaire pour que la radioactivité soit réduite à un niveau négligeable.

On assure la sécurité en isolant les déchets, en les stockant à distance, de façon à réduire le risque que des personnes y aient accès, et en les immobilisant, de façon qu'ils risquent moins de s'échapper et d'atteindre les personnes.

Le combustible épuisé est dangereux, mais, sur certains plans, il est le plus facile à gérer. Il contient des concentrations élevées de substances hautement

radioactives, dont certaines ne perdront complètement leur activité qu'après plusieurs millions d'années. Dans le système canadien, les radionucléides sont déjà immobiles, fixés dans la structure cristalline du combustible céramique à oxyde d'uranium, lequel est lui-même placé à l'intérieur d'au moins deux boîtes métalliques. L'isolation des déchets est donc le principal problème auquel il faut s'attaquer, et le Canada, comme d'autres pays, envisage de stocker le combustible épuisé à grande profondeur (jusqu'à 1 km) dans le substratum rocheux.

La plus grande partie des autres déchets radioactifs produits par l'industrie nucléaire et par d'autres secteurs sont moins dangereux. Les quantités sont plus faibles et les concentrations moins élevées, et les périodes radioactives sont de l'ordre des centaines et non des millions d'années. Une partie de ces déchets, par exemple ceux qui sont produits par les détecteurs de fumée, sont en quantité tellement faible qu'ils peuvent être évacués, ou éliminés, comme des déchets non radioactifs. La plus grande partie des substances radioactives incorporées à des produits de consommation peuvent être évacuées de cette façon. Les déchets gazeux et liquides hautement radioactifs sont solidifiés et le volume des déchets solides est réduit. La solidification aide à immobiliser les radionucléides, mais leur encapsulation dans du bitume, du béton ou du verre accroît encore le degré de protection. Les déchets sont ensuite enfouis. Certains, ceux qui possèdent une longue période radioactive, peuvent être placés dans des cavités rocheuses ou être enfouis profondément dans le sol, mais au-dessus de la nappe phréatique. Une couverture de béton est nécessaire pour empêcher l'eau de pénétrer et pour prévenir une exposition ou une perturbation accidentelle et prématurée par des foreurs et des mineurs.

Les centrales nucléaires produisent aussi d'importants volumes de déchets qui ont une faible activité totale, des périodes courtes et des concentrations faibles. L'eau légèrement contaminée qui a été renversée doit être épongée, et des déchets de papier ou de tissus sont alors produits. Les tuyaux, soupapes et autres parties des systèmes radioactifs doivent être remplacés. Les éléments enlevés doivent être traités comme des déchets radioactifs. Étant donné qu'ils présentent une faible concentration mais occupent un grand volume total, ces déchets sont soit incinérés, lorsqu'il est possible de le faire, soit placés dans des tranchées en béton ou dans des tranchées peu profondes en terre dans des zones contrôlées auxquelles l'accès du public est limité. Aux endroits où cette méthode a été adoptée, rien n'indique que le public ait jamais reçu de doses supérieures à une infime fraction de la dose de rayonnement naturel. Néanmoins, on cherche toujours à perfectionner les méthodes de manipulation de ces déchets.

Enfin, il existe des déchets gazeux et liquides dont le volume est trop grand et la concentration trop faible pour

qu'on puisse les traiter efficacement à un coût raisonnable. Ces déchets sont rejetés dans l'atmosphère et dans l'eau. Généralement, les déchets contiennent des gaz inertes (ainsi appelés parce qu'ils ne réagissent pas chimiquement et qu'ils sont très peu absorbés), du tritium sous forme de vapeur d'eau et du carbone 14. Les quantités qui peuvent être libérées de cette façon sont étroitement surveillées. La Commission de contrôle de l'énergie atomique établit dans sa réglementation portant sur les rejets que les doses reçues par les membres les plus exposés du public ne doivent pas dépasser une très faible fraction de la limite de dose annuelle. Les effets dus à ces faibles rejets ont été abordés dans une section précédente.

SOURCES NON NUCLÉAIRES

Les activités humaines dans lesquelles le matériau de base utilisé est constitué de sol ou de roche peuvent causer une augmentation des concentrations locales de radionucléides primitifs et de leurs produits de désintégration, même si, contrairement à l'extraction de l'uranium, elles ne sont pas destinées à des applications nucléaires. Par exemple, le simple fait de déplacer des matériaux d'un endroit où leur concentration naturelle est élevée à un endroit où elle est normalement faible entraîne une augmentation de l'exposition aux rayonnements au site récepteur. Un traitement physique ou chimique du sol ou de la roche peut s'accompagner d'un accroissement des concentrations de radionucléides soit dans le produit même, soit dans le flux de déchets. Par exemple, les concentrations d'uranium et de thorium et de leurs produits de désintégration sont habituellement plus faibles dans le charbon que dans les sols. Mais lorsque le charbon est brûlé, les concentrations de ces radionucléides dans les cendres restantes deviennent environ sept ou huit fois plus élevées que dans le charbon non brûlé. Les concentrations dans les déchets sont alors plus élevées que dans les sols d'origine. Une faible fraction des cendres est libérée dans l'air, mais le reste est éliminé dans des décharges. À la périphérie de la centrale thermique de Nanticoke (Ontario), une des plus grandes centrales alimentées au charbon au monde, la dose engagée reçue par ingestion à la suite du dépôt, sur la végétation en périphérie, des cendres volantes en suspension dans l'air est estimée à 0,00027 mSv par année d'exploitation. Cette dose représente environ 1 % de la dose correspondante mesurée à la périphérie de la centrale nucléaire de Pickering (Ontario).

Plusieurs autres activités humaines produisent soit une concentration de radionucléides naturels, soit un accroissement de l'exposition aux rayonnements ionisants naturels. La dose accrue de rayonnement reçue par le personnel navigant, en particulier celui du Concorde, a été couverte plus tôt. La roche phosphatée contient des concentrations relativement élevées de radionucléides primitifs. Son traitement en vue de produire de l'engrais entraîne une augmentation

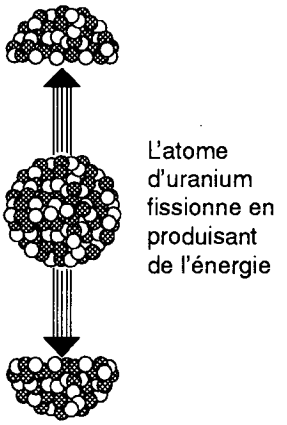
des concentrations de radionucléides dans le produit plutôt que dans les déchets. Néanmoins, au moins une partie des déchets présente encore des concentrations relativement élevées de radionucléides primitifs, et il faut tenir compte de ce facteur dans l'évacuation de ces déchets. Au Japon, le phosphogypse produit à partir des déchets d'usines d'engrais liquide est utilisé pour la fabrication de panneaux muraux. D'après le comité UNSCEAR, l'utilisation de ces panneaux muraux dans des bâtiments augmente le débit de dose annuel à l'intérieur d'environ 0,5 mSv par année. D'autres activités industrielles, par exemple l'utilisation de sable de zircon (sable contenant du zirconium) pour la fabrication de réfractaires et diverses opérations d'extraction et de traitement de métaux autres que l'uranium, produisent de petites doses additionnelles que reçoivent les travailleurs et le public. Cette situation est due à la présence de petites quantités d'uranium 238 et de thorium 232 dans les matières premières et les flux de déchets.

CHAPITRE 11

L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

À la fin des années 30, des scientifiques de l'Allemagne ont découvert que les atomes de l'uranium, une substance radioactive naturelle, en plus de se désintégrer en émettant un rayonnement bêta, se scindent, ou fissionnent, occasionnellement, en deux parties approximativement égales. Dans ce processus de fission, il y a libération d'énergie (figure 11.1).

FIGURE 11.1
FISSION DE L'ATOME



La quantité d'énergie produite peut être déterminée à l'aide de la célèbre relation établie par Einstein :

$$E = mc^2$$

D'après cette relation, lorsqu'une masse peut être convertie en énergie par un certain processus, la quantité d'énergie produite, E (en ergs), est obtenue en multipliant la masse (en grammes) par la vitesse de la lumière (en centimètres/secondes) au carré.

Dans la fission, une partie de la masse est convertie en énergie. Lorsqu'on compare la masse (ou le poids) d'un atome d'uranium avant la fission avec la masse des parties obtenues après la fission, on constate qu'il y a une perte de masse. La différence représente la masse convertie en énergie.

Masse avant = masse après + énergie

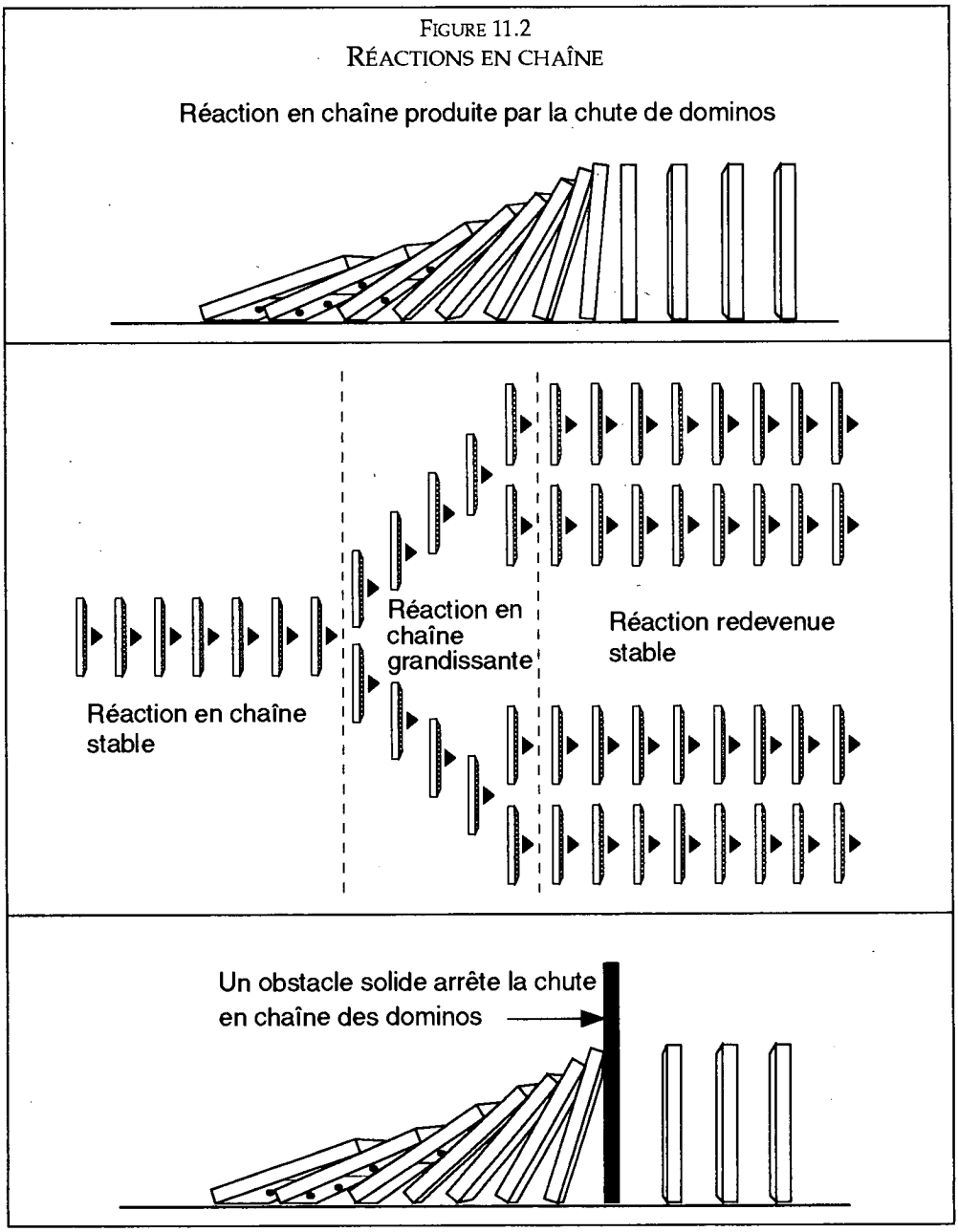
Une masse d'un gramme convertie en énergie donne :

9×10^{20} ergs, ou
9×10^{13} joules, ou
$2{,}5 \times 10^{7}$ kilowattheures.

Cette quantité d'énergie permettrait de faire bouillir l'eau dans une bouilloire électrique pendant plus de 1000 ans (à condition que la bouilloire ne manque jamais d'eau).

Une des découvertes qui a joué un rôle essentiel dans la mise en valeur de l'énergie nucléaire, tant à des fins militaires que pacifiques, est décrite ci-après. Pendant la fission, un ou deux neutrons sont émis à grande vitesse, et lorsqu'un de ces neutrons frappe un autre noyau d'uranium, il peut en causer la fission. La production d'énergie par ce processus était alors réalisable. Si une fission pouvait provoquer une autre fission, une série, ou chaîne, de

FIGURE 11.2
RÉACTIONS EN CHAÎNE



réactions pouvait être amorcée. Lorsque chaque fission provoque plus d'une fission, le nombre de réactions dans la chaîne augmente. Le processus peut être comparé au jeu dans lequel on aligne des dominos de telle façon que la chute d'un de ceux-ci entraîne la chute du voisin, et ainsi de suite (figure 11.2). Ce phénomène constitue une réaction en chaîne stable.

Lorsqu'un domino fait tomber deux dominos, comme dans le deuxième diagramme, la réaction s'intensifie. Par contre, dans une rangée où on insère des barres solides, la chute des dominos s'arrête. Les phénomènes qu'on vient de décrire pour les dominos sont similaires à ceux qu'on observe dans une réaction en chaîne provoquée par des neutrons et dans les moyens utilisés pour accroître ou réduire une telle réaction.

On a aussi découvert que s'ils étaient ralentis après avoir été émis au moment de la fission, les neutrons avaient de meilleures chances de provoquer la fission d'un autre atome d'uranium. De plus, la probabilité de fission de l'uranium 235 était beaucoup plus grande que celle de l'uranium 238, l'autre isotope principal de l'uranium. Les éléments essentiels importants pour la conception d'une réaction en chaîne contrôlée étaient alors en place.

- L'uranium devait former un arrangement régulier afin que les neutrons émis lorsqu'un noyau subit la fission puissent frapper d'autres atomes d'uranium.
- Les neutrons émis par les fissions devaient être ralentis, ou modérés, sans être absorbés.
- Un matériau absorbant les neutrons devait pouvoir être inséré dans l'assemblage pour régler ou arrêter la réaction.

Quelques substances ont la propriété de ralentir ou modérer les neutrons sans en absorber un trop grand nombre. Ces *modérateurs* sont le graphite (une forme de carbone), l'eau et l'*eau lourde*. Un assemblage composé de graphite et d'uranium naturel, ou d'eau lourde et d'uranium naturel, permet d'entretenir une réaction en chaîne. L'eau ordinaire absorbe les neutrons très rapidement. Par conséquent, pour obtenir une réaction en chaîne entretenue en utilisant l'eau ordinaire comme modérateur, il faut enrichir l'uranium en uranium 235.

Le dispositif utilisé pour amorcer, confiner et régler la fission est appelé *réacteur nucléaire*. Un réacteur se compose d'une cuve contenant une matrice de combustible à uranium, entourée d'un des matériaux modérateurs susmentionnés, avec des mécanismes pour l'insertion d'un absorbeur de neutrons dans l'arrangement régulier de combustible (figure 11.3).

Les diverses centrales nucléaires qui ont été conçues dans le monde comprennent un réacteur qui consiste en un ensemble formé d'un combustible à uranium, d'un modérateur et d'un circuit de caloportage. La chaleur

FIGURE 11.3
COEUR DU RÉACTEUR

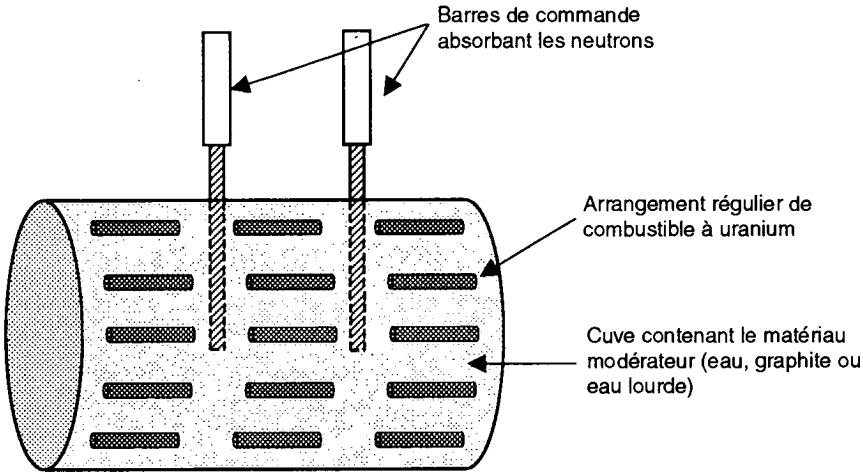
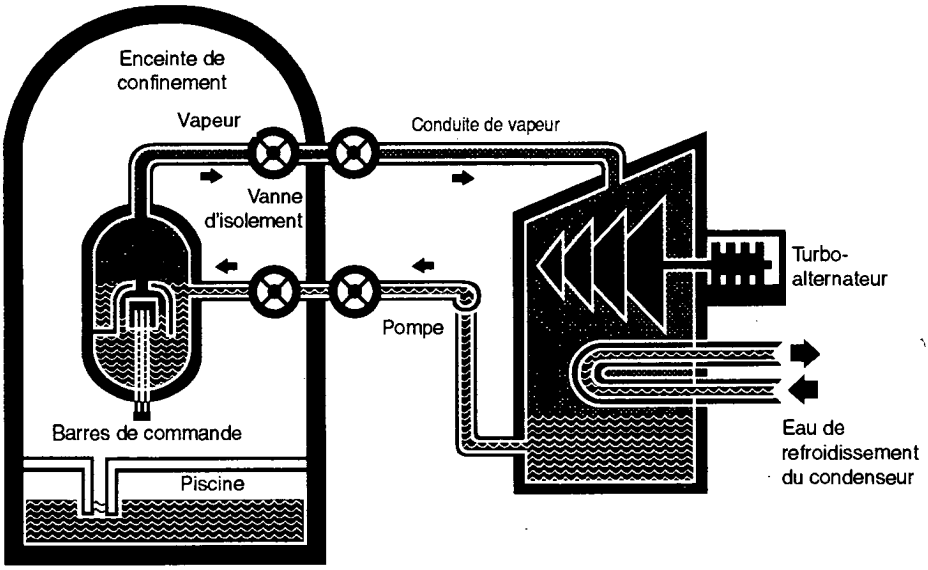


FIGURE 11.4
CENTRALE NUCLÉAIRE



produit de la vapeur, habituellement dans une chaudière, qui alimente une turbine, laquelle entraîne un alternateur qui produit de l'électricité (figure 11.4).

Les pays ont conçu des réacteurs présentant différentes combinaisons de matériaux utilisés comme combustible, modérateur et caloporteur, comme le montre le tableau ci-dessous. Les différents pays ont emprunté des voies différentes dans la conception des réacteurs en raison du rôle qu'ils ont joué dans la fabrication d'armes et de sous-marins nucléaires. De l'uranium fortement enrichi en isotope U 235 est requis pour la fabrication d'une arme nucléaire.

Tant les États-Unis que l'ancienne Union soviétique (AUS) avaient construit les installations coûteuses requises pour l'enrichissement de l'uranium en isotope U 235, et l'eau est évidemment un modérateur bon marché, de sorte que ces deux pays ont conçu des réacteurs dans lesquels ces matériaux sont utilisés. Comme ni le Canada ni le Royaume-Uni ne possédaient d'installations d'enrichissement, ils n'ont pas conçu de réacteurs dans lesquels l'uranium enrichi serait utilisé. Dans le cadre de la concertation des efforts pendant la Seconde Guerre mondiale, le Canada a produit de l'eau lourde. Ce composé, qui s'est révélé le meilleur de tous les modérateurs, pouvait être utilisé pour la conception de réacteurs au pays. Le type de réacteur qu'on a conçu est appelé réacteur CANDU (réacteur CANadien à Deutérium-Uranium).

Le réacteur CANDU

Le premier réacteur CANDU, le NPD, a été construit par EACL, à Rolphton (Ontario); il a commencé à produire de l'électricité en 1962. Il était exploité par Ontario Hydro. Le premier réacteur CANDU grandeur réelle a été le réacteur de Douglas Point, en bordure du lac Huron. Il a lui aussi été construit par EACL et exploité par Ontario Hydro.

Type de réacteur	Combustible	Modérateur	Caloporteur
REP, É.-U.	UO_2 enrichi	Eau	Eau
REB, É.-U.	UO_2 enrichi	Eau	Eau
REP, AUS	UO_2 enrichi	Eau	Eau
RBMK, AUS	UO_2 enrichi	Graphite	Eau
Gaz/graphite, R.-U.	U naturel	Graphite	Dioxyde de carbone
RAG, R.-U.	UO_2 naturel	Graphite	Hélium
CANDU	UO_2 naturel	Eau lourde	Eau lourde

REP - Réacteur à eau sous pression
REB - Réacteur à eau bouillante
RAG - Réacteur avancé refroidi par gaz
RBMK - Acronyme formé à partir de l'expression russe signifiant réacteur refroidi à l'eau et utilisant du graphite comme modérateur (type Tchernobyl)

Il a commencé à produire de l'électricité en 1967. On compte aujourd'hui 20 réacteurs dans cinq grandes centrales nucléaires en service en Ontario. Des centrales nucléaires comptant chacune un seul réacteur sont aussi en service au Nouveau-Brunswick et au Québec (figure 11.5).

Ontario Hydro et EACL ont tous deux continué de concevoir des réacteurs nucléaires. Les réacteurs qu'ils ont conçus diffèrent sur certains aspects particuliers, mais ils sont basés sur le même principe que les premiers réacteurs. Un réacteur CANDU type est représenté à la figure 11.7. Le combustible est assemblé en grappes (figure 11.6) dans des tubes de force qui traversent une grande cuve, appelée la calandre, laquelle contient de l'eau lourde destinée à modérer les neutrons émis dans le processus de fission qui se produit dans les grappes de combustible.

Des barres de commande qui absorbent les neutrons pénètrent dans la calandre entre les tubes de force. L'eau lourde circule sur les grappes de combustible et transfère la chaleur produite dans ces grappes à une chaudière où de l'eau ordinaire (ou légère) est portée à ébullition pour produire de la vapeur qui entraîne la turbine. Le matériau combustible est du dioxyde d'uranium (UO_2), substance semblable à la céramique, qui est très stable et ne brûle pas. Lorsque le réacteur est en marche, l'uranium 235 contenu dans le combustible est consommé et il doit finalement être remplacé. Le combustible épuisé contient des produits de fission qui sont hautement radioactifs.

Les machines de chargement du combustible sont conçues pour être raccordées à chaque extrémité d'un tube de force, enlever un bouchon qui ferme l'extrémité du tube et transférer le combustible épuisé du réacteur à une machine et le combustible neuf de l'autre machine au réacteur. Le combustible épuisé est transféré de la machine de chargement à une piscine de stockage, dont la structure est presque identique à celle d'une grande piscine profonde. Les grappes de combustible épuisé peuvent y être stockées sans danger pendant tout le temps nécessaire pour qu'on en arrive à une décision concernant leur évacuation ou élimination finale. Les grappes de combustible pourraient, à un certain moment dans le futur, constituer une source utile de nouveau matériau combustible, étant donné que chaque grappe contient du plutonium 239, qui fissionne comme l'uranium 235. Il est peu probable que cette source soit utilisée avant un long moment, et même qu'elle le soit un jour, étant donné qu'on a découvert d'importants gisements d'uranium à très haute teneur au Canada et en Australie.

Dans un réacteur, une partie de l'uranium ne subit pas la fission. Généralement, dans un réacteur CANDU, chaque kilogramme d'uranium produit $3{,}5 \times 10^4$ kilowattheures d'énergie. Il faudrait brûler environ 70 000 kg de charbon pour produire la même quantité d'énergie. À cet égard, l'énergie

FIGURE 11.5

CARTE DES CENTRALES NUCLÉAIRES CANADIENNES

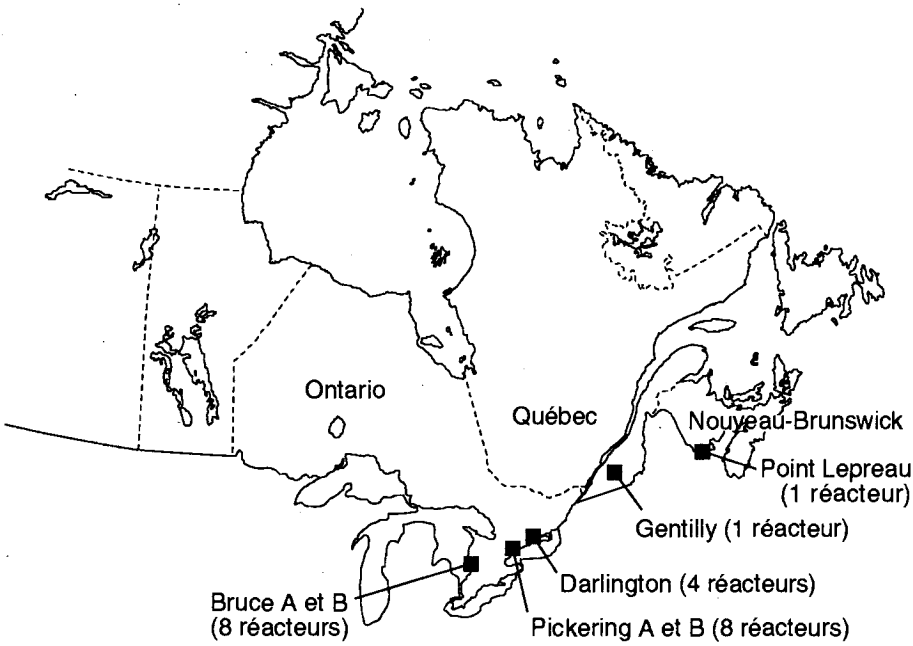
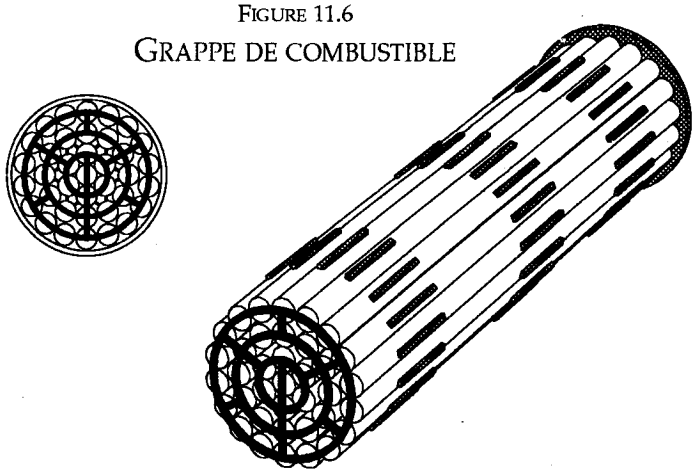


FIGURE 11.6

GRAPPE DE COMBUSTIBLE



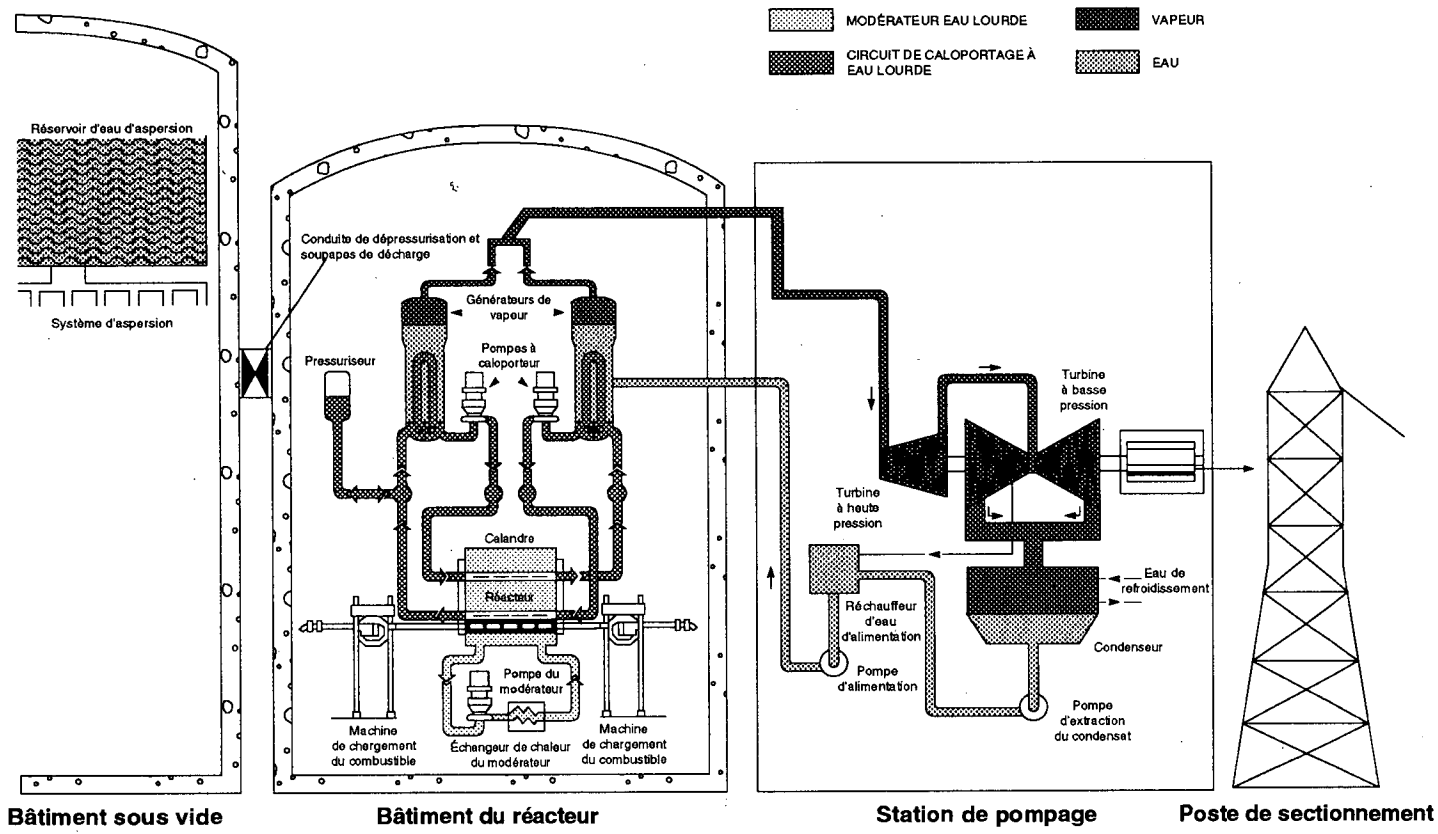


FIGURE 11.7
SYSTÈME GÉNÉRATEUR DU RÉACTEUR CANDU (CENTRALE À PLUSIEURS RÉACTEURS)

nucléaire présente un avantage : la masse de combustible neuf et celle du combustible épuisé sont relativement faibles. De plus, il n'y pas d'émission de gaz de combustion pouvant produire des pluies acides ou accroître l'effet de serre. Les inconvénients ont notamment trait à la sûreté. Les réacteurs peuvent atteindre très rapidement des niveaux de puissance très élevés. Et après avoir été en service pendant un certain temps, ils contiennent de grandes quantités de substances radioactives dangereuses dont la gestion demande des précautions particulières.

SÛRETÉ DES RÉACTEURS

Dans un réacteur, le processus de fission est en fin de compte la source de chaleur. Chaque fission ne produit qu'une petite quantité d'énergie (chaleur), mais le nombre de fissions produites par seconde dans un réacteur de puissance est considérable. Chaque fission donne deux atomes comme produits de fission (figure 11.8).

Les produits de fission sont habituellement radioactifs, de sorte que lorsqu'un réacteur est en service, des produits de fission radioactifs s'accumulent dans les grappes de combustible.

L'uranium 235 fissile contenu dans le réacteur finit par s'épuiser. S'il n'est pas remplacé par du nouveau combustible, la réaction en chaîne s'arrête. Une grappe de combustible dont la plus grande partie de l'uranium 235 fissile a été épuisée contient une grande quantité de produits de fission accumulés. Elle est hautement radioactive, et elle doit être retirée du réacteur par télémanipulation et stockée sous au moins 3 m d'eau dans la piscine de stockage du combustible épuisé. Le réacteur comprend environ 4000 grappes de combustible, de sorte qu'il contient une quantité énorme de produits de fission radioactifs. Il est important de prévenir la fuite de ces produits de fission dans l'environnement. Ceux-ci doivent être confinés à l'intérieur du circuit de caloportage ou des bâtiments de la centrale. Par ailleurs, la puissance du réacteur doit être réglée rigoureusement. La technologie ou les méthodes permettant de réaliser ces conditions constituent ce qu'on appelle la *sûreté des réacteurs*.

Il importe de tenir compte des deux caractéristiques suivantes d'un réacteur pour confiner les produits de fission à l'intérieur des grappes de combustible. Premièrement, un réacteur peut passer très rapidement d'une basse puissance à une puissance très élevée. Si elle n'est pas réglée, la puissance du réacteur peut atteindre des niveaux assez élevés pour détruire les grappes de combustible, la structure du réacteur et même les bâtiments qui logent la structure du réacteur. Dans l'exemple des dominos utilisé pour fins de comparaison, le taux d'augmentation de la puissance est l'équivalent du passage, sur une courte période, de la chute de quelques dominos par seconde à la chute de millions de dominos par seconde.

Un des objectifs de la sûreté des réacteurs est de prévenir de tels emballements de puissance.

Deuxièmement, les produits de fission accumulés dans les grappes de combustible produisent de l'énergie au moment de leur désintégration radioactive. Cette énergie continue à être produite même après l'arrêt du réacteur. Initialement, soit juste après l'arrêt d'un réacteur, l'énergie des produits de fission représente environ 7 % de l'énergie de pleine puissance. Elle est suffisante pour provoquer la fusion des grappes de combustible (et causer ainsi la fuite de produits de fission) lorsque le refroidissement n'est pas maintenu. Par conséquent, un deuxième objectif de la sûreté des réacteurs est de maintenir en tout temps le refroidissement du combustible.

Si les mesures prises pour contrôler le réacteur et maintenir le refroidissement du combustible ne sont pas efficaces, des mesures additionnelles sont prises pour faire en sorte que les substances radioactives ne puissent avoir d'effets néfastes sur aucun membre du public. Les deux plus importantes de ces mesures sont de confiner le système du réacteur dans un bâtiment présentant peu de fuites (le système de confinement) et d'interdire la construction de maisons dans un rayon d'au moins 1 km de tout réacteur.

RÉGLAGE DE LA PUISSANCE D'UN RÉACTEUR EN CONDITIONS D'EXPLOITATION NORMALE

Pour prévenir le rejet de substances radioactives, on a recours à une conception, des méthodes d'exploitation et une formation du personnel de la centrale de haute qualité. En conditions d'exploitation normale, la commande du réacteur est réalisée par le *système de réglage*. Ce système règle le niveau de puissance et ne lui permet qu'une variation lente. Il est de haute qualité et est habituellement triple. Chacune des parties du système triple peut être mise hors service pour des fins d'essais et d'entretien pendant que le réacteur est en marche.

SYSTÈMES SPÉCIAUX DE SÛRETÉ

Totalement distincts du système de réglage, et indépendants de celui-ci, il existe des systèmes appelés *systèmes spéciaux de sûreté*. Ces systèmes ont pour fonction de rendre très peu probables les fuites de substances radioactives dans quelque circonstance que ce soit.

Le premier des systèmes spéciaux de sûreté est le système d'arrêt. Un réacteur CANDU moderne comprend deux systèmes d'arrêt (figure 11.9). Ces deux systèmes sont indépendants l'un de l'autre, et chacun est capable d'arrêter le réacteur. Un des systèmes consiste en des absorbeurs de neutrons prêts à être insérés dans le réacteur pour arrêter la

FIGURE 11.8

FISSION DE L'ATOME D'URANIUM

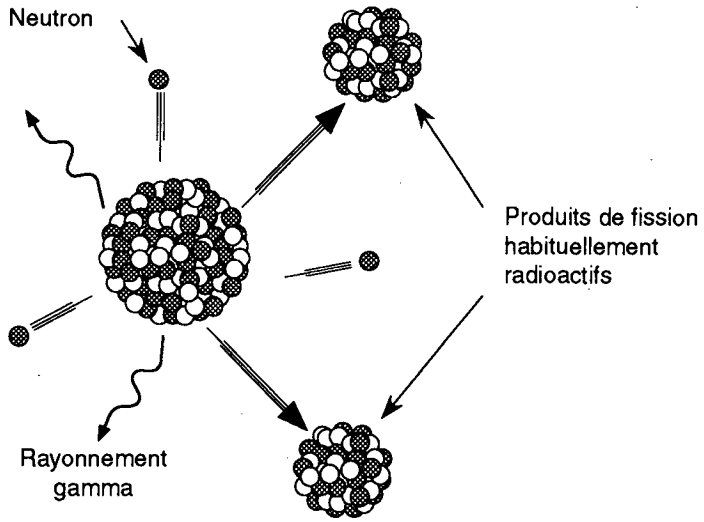
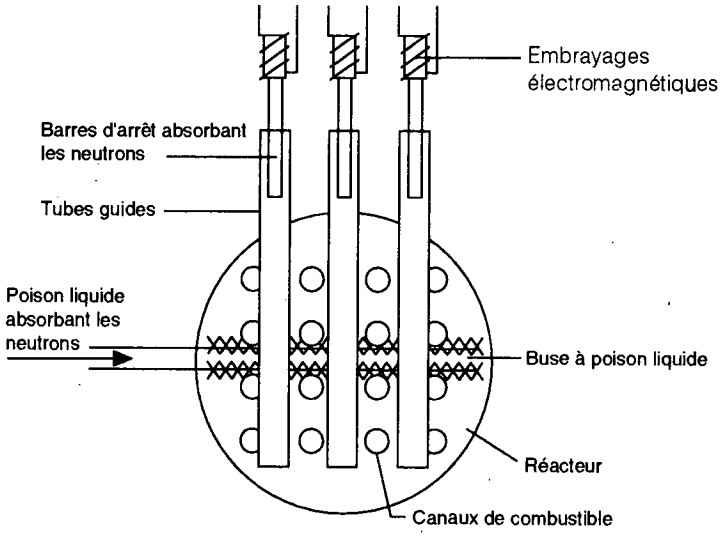


FIGURE 11.9

SYSTÈME D'ARRÊT

INJECTION DE «POISON» LIQUIDE ET BARRES D'ARRÊT



réaction en chaîne (dans l'exemple des dominos, l'analogie serait l'insertion de pièces métalliques solides dans les rangées de dominos en chute). On utilise aussi un autre système prêt à injecter un absorbeur de neutrons liquide, ou «poison», par exemple du bore, dans l'eau lourde utilisée comme modérateur dans le réacteur. L'exécution d'essais sur ces systèmes et leur entretien ne les empêchent pas d'être toujours en mesure d'intervenir, au besoin, pour arrêter le réacteur.

SYSTÈMES DE REFROIDISSEMENT D'URGENCE

En plus des systèmes normaux servant à refroidir continuellement les grappes de combustible, le réacteur comprend des systèmes destinés à permettre le refroidissement en situation d'urgence. Le système d'injection d'urgence permet d'injecter de l'eau de refroidissement à pression élevée sur les grappes de combustible s'il se produit un bris du circuit de caloportage et un arrêt du refroidissement normal.

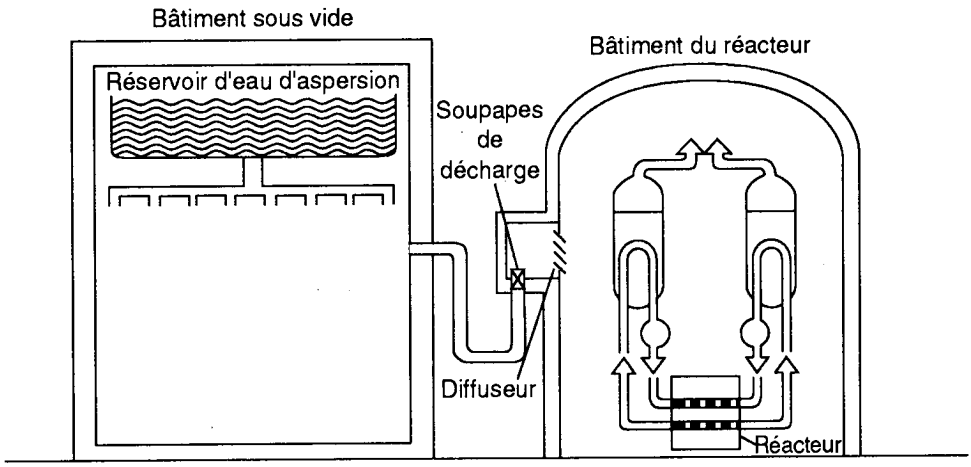
SYSTÈMES DE CONFINEMENT

La plupart des réacteurs de puissance sont logés dans des bâtiments destinés à résister à la pression de la vapeur et à confiner les produits de fission radioactifs en cas de bris dans le circuit de caloportage à haute pression. Certains des réacteurs à gaz du Royaume-Uni et les réacteurs RBMK de l'ancienne Union soviétique font cependant exception à cette règle. Les réacteurs américains sont confinés dans un bâtiment conçu pour résister à l'entière augmentation de pression créée lorsqu'un bris se produit dans le circuit. Dans le modèle CANDU, il existe deux types de confinement. Dans les centrales à un seul réacteur de 600 mégawatts (électriques) d'EACL, toute vapeur s'échappant en raison d'un bris du circuit de caloportage est refroidie par un système de pulvérisation d'eau froide (le système d'aspersion). L'augmentation de pression est confinée dans le bâtiment du réacteur, et les fuites dans l'environnement sont très faibles. Dans les centrales à plusieurs réacteurs d'Ontario Hydro, on utilise un système de confinement unique (figure 11.10). Chaque bâtiment de réacteur est relié, par une conduite de dépressurisation et des soupapes de décharge, à un grand bâtiment dans lequel l'air est maintenu bien au-dessous de la pression atmosphérique normale et qu'on appelle, pour cette raison, bâtiment sous vide.

Une augmentation de pression causée par la vapeur rejetée en raison d'un bris du circuit de caloportage provoque l'ouverture des soupapes de la conduite, et le bâtiment du réacteur est alors relié au bâtiment sous vide. La vapeur qui entre dans le bâtiment sous vide est aspergée d'eau froide provenant d'un réservoir d'eau d'aspersion et elle se condense. La pression finale dans les deux bâtiments est inférieure à la pression atmosphérique, de sorte que le risque de rejet de substances radioactives est maintenu à un bas niveau.

FIGURE 11.10

SYSTÈME DE CONFINEMENT D'UNE CENTRALE À PLUSIEURS RÉACTEURS



CHAPITRE 12

LA PLANIFICATION DES MESURES D'URGENCE

BUT DE LA PLANIFICATION DES MESURES D'URGENCE

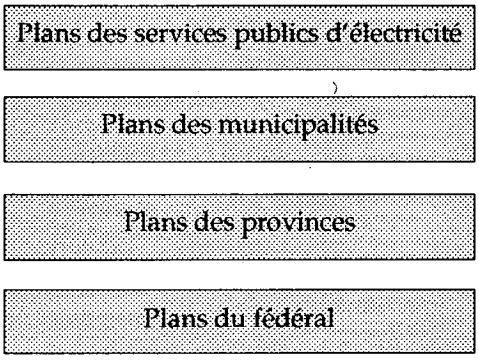
Les réacteurs nucléaires, en particulier les réacteurs de puissance, peuvent subir des accidents ayant des conséquences graves. La probabilité qu'un accident de cette nature se produise dans un réacteur de puissance canadien est faible. Mais il demeure sage de planifier des mesures d'urgence en vue d'assurer la protection du public et du personnel des centrales. Parmi les accidents notables survenus avec des réacteurs, il faut mentionner ceux du réacteur NRX, à Chalk River (Ontario), en 1952, du réacteur Windscale, au Royaume-Uni, en 1956, du réacteur de Three Mile Island, aux États-Unis, en 1979, et du réacteur de Tchernobyl, dans l'ancienne Union soviétique, en 1986. Les analyses de ces accidents et de certains autres ont permis d'améliorer la sûreté des réacteurs et d'établir la base pour la planification des mesures d'urgence.

Les réacteurs nucléaires présentent un risque d'accident pour bon nombre de raisons. Dans le cas d'une perte de contrôle de la réaction en chaîne, un réacteur peut produire un niveau de puissance beaucoup plus élevé que le niveau de pleine puissance prévu. En outre, si le réacteur a été exploité en régime de puissance pendant une certaine période, les grappes de combustible du cœur contiennent de grandes quantités de produits de fission radioactifs dangereux. Enfin, il est impossible d'arrêter complètement la production d'énergie par un réacteur; les produits de fission accumulés dans le combustible continuent de produire de l'énergie. Immédiatement après un arrêt de fonctionnement à pleine puissance, cette énergie générée par les produits de fission représente environ 7 % de l'énergie produite au niveau de pleine puissance. Dans le cas d'une centrale thermique de 1500 mégawatts, cette énergie résiduelle représente environ 100 mégawatts d'énergie thermique, soit approximativement l'énergie thermique que pourraient produire 100 000 bouilloires électriques. Étant donné ces caractéristiques des réacteurs nucléaires, il faut installer des systèmes spéciaux de sûreté afin que la probabilité d'accidents soit extrêmement faible. Certains détails relatifs aux systèmes spéciaux de sûreté des réacteurs ont été présentés au chapitre 11. En gros, les systèmes de sûreté comprennent

les systèmes de protection servant à limiter la puissance du réacteur, les systèmes de refroidissement destinés à prévenir le réchauffement excessif du combustible et les systèmes destinés à confiner les fuites de produits de fission. Ils doivent satisfaire aux exigences de la Commission de contrôle de l'énergie atomique (CCEA) en matière de délivrance de permis. En outre, la CCEA exige de l'exploitant du réacteur la mise en place de plans d'urgence satisfaisants. Ces plans sont considérés comme un niveau supplémentaire de protection qu'on prévoit n'avoir jamais à utiliser, un peu comme une assurance-incendie pour la maison.

RESPONSABILITÉ DE LA PLANIFICATION DES MESURES D'URGENCE

Sur le plan de la réglementation, la responsabilité de la planification des mesures d'urgence au Canada est partagée. La Commission de contrôle de l'énergie atomique accorde un permis d'exploitation d'un réacteur nucléaire à un service public d'électricité si elle est convaincue que le réacteur est sûr, qu'un plan d'urgence adéquat applicable sur le site est en place et qu'un plan d'urgence provincial applicable à l'extérieur du site existe. La responsabilité de la réglementation des plans applicables à l'extérieur du site appartient à la province dans laquelle se trouve le réacteur. Comme un bon nombre des forces d'intervention qui seraient déployées relèvent des autorités municipales, les municipalités se trouvant à proximité d'une centrale préparent aussi des plans d'urgence. Cependant, si un accident nucléaire provoquait le rejet de substances radioactives qui traverseraient des frontières internationales ou provinciales, un certain nombre d'organismes fédéraux, en plus de la CCEA, participeraient au processus, pour s'occuper d'aspects comme les télécommunications internationales et les dispositions concernant l'aide à apporter. Au Canada, la planification globale des mesures d'urgence en cas d'accident nucléaire nécessite la coordination des plans de tous les organismes aux différents paliers de gouvernement.

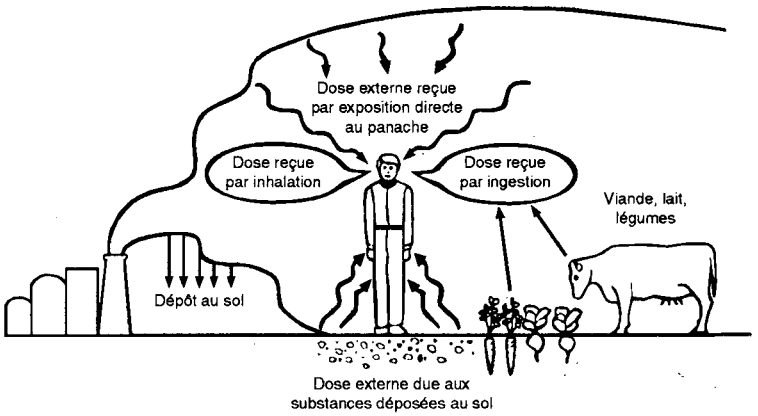


S'il arrivait qu'un niveau de puissance élevé incontrôlé se produise, que le combustible soit surchauffé, et qu'en plus le système de confinement soit défectueux, des produits de fission pourraient être rejetés dans l'atmosphère. Les produits qui risquent le plus d'être rejetés sont soit gazeux, soit volatils. Les produits de fission importants dans ces catégories sont le xénon 133 et le krypton 88, qui sont gazeux, les isotopes radioactifs de l'iode,

qui sont volatils, et les isotopes radioactifs du césium, qui sont semi-volatils.

Un rejet peut être de courte période, c'est-à-dire produit sous forme d'une «bouffée», ou durer une période de plusieurs jours, ou être des deux types. Le nuage ou panache radioactif émis peut causer une exposition des personnes de plusieurs façons. Le rayonnement émis par les radionucléides contenus dans le nuage peut causer une exposition directe des personnes qui ne sont pas protégées. Cette exposition directe cesse lorsque le nuage s'éloigne et est dispersé par le vent dominant. L'inhalation des radionucléides contenus dans le panache peut aussi causer une exposition. Lorsque le rejet n'est constitué que de gaz rares, aucune autre dose de rayonnement n'est reçue après le passage du nuage. Lorsque le panache contient de l'iode radioactif ou les produits de fission semi-volatils du césium, outre la dose reçue par exposition directe au panache et par inhalation, une dose serait reçue par exposition aux substances radioactives déposées à la surface du sol et par l'ingestion de légumes et de céréales contaminés. Ces aliments peuvent être contaminés par des substances radioactives déposées à leur surface ou par des substances radioactives absorbées à partir du sol contaminé. Le lait provenant de bovins laitiers élevés sur des pâturages contaminés par l'iode 131 est aussi contaminé. La viande provenant de bétail élevé sur des pâturages contaminés par les produits de fission du césium peut être contaminée. Dans la planification des mesures d'urgence, il faut tenir compte de toutes ces voies d'exposition possibles et établir des mesures qui réduiront au minimum l'exposition potentiellement néfaste du public.

FIGURE 12.1
PRINCIPALES VOIES D'EXPOSITION À LA SUITE D'UN REJET ACCIDENTEL DE SUBSTANCES RADIOACTIVES À PARTIR D'UN RÉACTEUR



PLANIFICATION DES MESURES D'URGENCE SUR LE SITE

Chaque centrale nucléaire au Canada possède un plan d'urgence applicable sur le site, conformément aux exigences de la Commission de contrôle de l'énergie atomique. Les mesures prises en vertu du plan ont trait notamment à l'établissement d'un contrôle des rejets possibles, à la protection du personnel de la centrale, à l'évaluation de l'étendue possible de la situation d'urgence et à l'avertissement des autorités provinciales responsables des mesures d'urgence à l'extérieur du site. Le personnel de la centrale effectue les contrôles du rayonnement et les mesures de contamination initiaux à l'extérieur du site. Et si les conditions le justifient, il demande aux autorités locales, par exemple à la police, de prendre les mesures nécessaires pour protéger le public.

PLANIFICATION DES MESURES D'URGENCE À L'EXTÉRIEUR DU SITE

Les plans d'urgence applicables à l'extérieur des sites de centrales nucléaires relèvent de la province. Les plans des centrales sont similaires, mais pas identiques, d'une province à l'autre. La planification est habituellement élaborée en considérant trois phases dans la situation d'urgence :

- la phase d'exposition au panache, habituellement de courte période et correspondant au rejet d'un nuage de gaz radioactif à partir de la centrale;

- la phase d'ingestion, qui existe généralement après le passage du panache et le dépôt de substances radioactives au sol et leur transfert possible dans les chaînes alimentaires;

- la phase de récupération, qui suit la phase d'ingestion et pendant laquelle des mesures sont prises pour ramener à la normale les conditions dans les zones touchées; cette phase peut être prolongée.

Les mesures d'urgence prises en vertu du plan sont dirigées par un groupe de direction provincial, ou un directeur, appuyé par un groupe de l'exploitation, un groupe technique et un groupe de l'information. Sur l'ordre du groupe de direction, le groupe de l'exploitation mobilise des forces d'intervention à l'extérieur du site, par exemple les forces policières provinciales, ou demande aux responsables municipaux de mobiliser leurs forces. Le groupe technique fournit des conseils sur les conditions radiologiques et sur les conditions prévues ainsi que sur les mesures à prendre pour réduire au minimum la dose reçue par le public. Le groupe de l'information rassemble les données de tous les groupes participant à l'intervention, ce qui permet aux

porte-parole du gouvernement provincial, de la municipalité et des services publics d'électricité de publier rapidement, à l'intention du public, des rapports cohérents et exacts sur la situation.

Certaines mesures de protection sont planifiées au préalable : le contrôle d'accès, l'évacuation et la mise à l'abri, et les restrictions relatives à la consommation de l'eau et des aliments.

Mesures de protection planifiées pour une situation d'urgence
Mise à l'abri à l'intérieur
Distribution de comprimés d'iode
Évacuation temporaire
Interdiction de consommation d'aliments contaminés

Le lait et les autres produits laitiers méritent une attention particulière en raison de la voie d'exposition allant, dans le cas de l'iode radioactif, du panache aux pâturages, aux vaches, au lait et, finalement, aux personnes. Une personne qui boit du lait contaminé par l'iode 131 reçoit une forte dose à la thyroïde parce que l'iode 131 se concentre dans cet organe. Il faut accorder un intérêt particulier aux enfants en raison du rôle relativement important joué par le lait dans leur régime alimentaire. Pour cette voie d'exposition, une mesure de protection adéquate consiste à prendre des comprimés d'iode stable, qui sont habituellement des comprimés d'iodure ou d'iodate de potassium. Les comprimés saturent la thyroïde d'iode stable, ce qui prévient l'absorption de l'iode radioactif. Pour être efficaces, ils doivent être pris immédiatement avant l'exposition, ou moins de cinq heures, environ, après l'exposition.

Dans la plupart des plans d'urgence provinciaux, on a établi des valeurs de débit de dose dans les zones publiques ou des niveaux de radioactivité dans les aliments, le lait, etc., auxquels des mesures de protection définies sont appliquées. Ces valeurs et niveaux sont appelés des *niveaux d'intervention*. En fait, les niveaux d'intervention sont habituellement des plages, plutôt que des valeurs uniques. Ainsi, on fait dans une certaine mesure appel au jugement afin de tenir compte des circonstances propres à une situation particulière. Il est important de déterminer si les bénéfices découlant de l'application de la mesure sont plus importants que tout effet néfaste qui lui est associé. Toutes les provinces possédant des programmes d'énergie nucléaire ont des plans d'urgence applicables à l'extérieur des sites. Les niveaux d'intervention et les autres mesures d'intervention planifiées au préalable diffèrent de façon appréciable d'une province à l'autre, de sorte qu'il n'y a pas de norme commune pour l'ensemble du pays. Des exemples de niveaux d'intervention pour l'Ontario sont montrés dans le tableau qui suit.

EXEMPLES DE MESURES DE PROTECTION ET DE NIVEAUX D'INTERVENTION TIRÉS DU PLAN D'URGENCE DE L'ONTARIO

Mesure de protection	Organe	Niveau d'intervention inférieur (mSv)	Niveau d'intervention supérieur (mSv)
Mise à l'abri	Corps entier Thyroïde	1 3	10 30
Évacuation	Corps entier Organe unique	10 30	100 300
Administration d'iode stable	Thyroïde	30	300
Contrôles d'aliments	Corps entier	0,5 1,5	5 15

Le gouvernement fédéral a la responsabilité de prendre les mesures nécessaires dans les conditions d'accidents nucléaires qui touchent deux provinces ou plus, qui se produisent dans un autre pays ou qui mettent en cause du matériel appartenant à un autre pays, par exemple dans le cas de l'écrasement d'un satellite alimenté à l'énergie nucléaire. Les organismes et ministères fédéraux prennent des mesures conformément au Plan d'intervention fédéral en cas d'urgence nucléaire (PIFUN), dont Santé Canada est l'organisme directeur. Ce ministère maintient aussi un réseau de surveillance radiologique couvrant l'ensemble du Canada. Le système de surveillance peut détecter la contamination en suspension dans l'air produite par des accidents importants survenus dans d'autres pays, par exemple la contamination produite par l'accident de Tchernobyl. De nombreux ministères fédéraux ont des responsabilités découlant du PIFUN. Protection civile Canada, Environnement Canada et la Commission de contrôle de l'énergie atomique ont des rôles importants à jouer. Le plan a été appliqué en entier en 1988, en prévision de la rentrée du satellite COSMOS 1900 de l'ancienne Union soviétique, et on était prêt à l'appliquer lors de l'accident de Tchernobyl, mais il n'a pas été nécessaire d'aller de l'avant.

Une contamination radioactive répandue a été produite en Europe à la suite de l'accident de Tchernobyl. Cet événement a mis en évidence la nécessité d'accords internationaux relatifs à la communication d'avertissements en cas d'accidents et aux dispositions à prendre en matière d'aide. Les grandes différences entre les niveaux d'intervention d'un pays à l'autre en Europe ont aussi causé une certaine confusion et une perte de confiance des populations en leurs gouvernements nationaux. En 1986, le Canada a signé un accord

de collaboration avec les États-Unis relativement aux urgences nucléaires, et en 1990, il a signé des accords internationaux concernant la communication d'avertissements et les dispositions en matière d'aide à apporter à la suite d'accidents nucléaires.

CHAPITRE 13
LA RÉGLEMENTATION DES RAYONNEMENTS IONISANTS

LES LOIS ET LEUR ADMINISTRATION

Au Canada, il existe des lois fédérales et provinciales qui régissent l'utilisation des substances radioactives, les dispositifs émettant des rayonnements et l'exposition aux rayonnements ionisants. Les principales lois fédérales sont :

- LA *LOI SUR LES DISPOSITIFS ÉMETTANT DES RADIATIONS* ET
- LA *LOI SUR LE CONTRÔLE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE*

La *Loi sur les dispositifs émettant des radiations* prescrit des normes pour les dispositifs qui émettent des rayonnements ionisants, dans le but de protéger la santé et la sécurité des Canadiens. Cette loi et le règlement afférent sont administrés par Santé Canada. La loi vise le matériel émettant des rayonnements comme les machines à rayons X importées et vendues au Canada.

Toutefois, ce sont les provinces qui assument la responsabilité du contrôle de l'*utilisation* des dispositifs émettant des rayonnements comme les machines à rayons X utilisées en dentisterie. Les provinces réglementent et surveillent l'exposition aux rayonnements ionisants pouvant provenir de dispositifs (mais non de substances radioactives). Certaines provinces comme la Saskatchewan ont préparé leur propre législation sur l'exposition aux rayonnements ionisants. Cela montre que les compétences en matière de réglementation de l'exposition aux rayonnements ionisants ne sont pas bien définies. Malgré cela, le système fonctionne étonnamment bien.

La *Loi sur le contrôle de l'énergie atomique* et le *Règlement sur le contrôle de l'énergie atomique* afférent à la loi servent à encadrer l'utilisation des substances radioactives et des substances fissiles ou des processus de fission qui pourraient être utilisés dans une réaction en chaîne. Le but de la loi est de protéger la santé et la sécurité des Canadiens.

La Commission de contrôle de l'énergie atomique (CCEA) administre la *Loi sur le contrôle de l'énergie atomique* et joue le rôle de chef de file en matière de réglementation des installations et des substances nucléaires. Les commissaires de la CCEA sont nommés par le

gouvernement fédéral et sont choisis pour leur compétence dans des secteurs pertinents comme les sciences, le génie et la médecine. La CCEA est composée de cinq commissaires, dont quatre sont nommés directement par arrêté en conseil du gouvernement fédéral. Le cinquième, le président du Conseil national de recherches du Canada, est nommé d'office. Le personnel de la CCEA met en œuvre les politiques de réglementation établies par les commissaires.

RÉGLEMENTATION DES INSTALLATIONS ET DES SUBSTANCES NUCLÉAIRES, ET DÉLIVRANCE DES PERMIS

Les installations nucléaires qui sont réglementées par la CCEA comprennent les réacteurs de puissance et de recherche, les mines, les usines de concentration et les raffineries d'uranium, les usines de fabrication du combustible nucléaire, les accélérateurs de particules, les usines d'eau lourde et les installations de gestion des déchets radioactifs.

Le processus de délivrance des permis est le même pour toutes les installations nucléaires. Il comporte trois grandes étapes :

- l'acceptation du site,
- l'autorisation de la construction, et
- la délivrance d'un permis d'exploitation.

À chaque étape, le demandeur est tenu de démontrer que son installation peut être construite et exploitée sans risque indu pour les travailleurs, la population et l'environnement. Tout au cours de l'exploitation de l'installation, la CCEA surveille sa performance pour assurer que les conditions du permis sont respectées. Ainsi, des agents de projet sont affectés sur le site de chaque centrale nucléaire pour en assurer la surveillance.

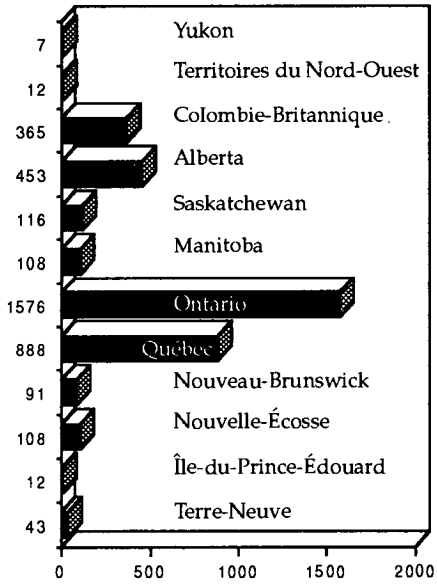
À la fin de la vie utile d'une installation, cette dernière doit être déclassée, ou désaffectée, d'une manière qui est acceptable pour la CCEA. Le site doit être remis dans un état d'utilisation non limitée ou géré jusqu'à ce qu'il ne présente plus aucun danger pour la santé et la sécurité humaines, et pour l'environnement.

RÉGLEMENTATION DES SUBSTANCES NUCLÉAIRES

Les substances nucléaires sont soit des radionucléides, soit des «articles ou substances réglementés». Les articles ou substances réglementés sont essentiellement du matériel ou des substances qui peuvent servir à produire ou à utiliser de l'énergie nucléaire. Cela comprend par exemple le matériel qui peut servir à séparer des isotopes, les barres de commande dans les réacteurs nucléaires et le matériel servant à la fabrication du combustible nucléaire. Le Canada s'est engagé à utiliser pacifiquement l'énergie nucléaire, et les mesures de contrôle visent à empêcher toute utilisation de cette puissante source d'énergie à des fins hostiles.

La CCEA délivre un grand nombre de permis de radio-isotopes. Les permis sont assortis de conditions que l'utilisateur doit respecter. Les inspecteurs de la CCEA vérifient régulièrement si ces conditions sont effectivement respectées. En 1992, environ 3800 permis étaient en vigueur partout au Canada (figure 13.1), autant des permis d'utilisation de sources radioactives à des fins de diagnostic et de traitement médicaux (détails au chapitre 7) que des permis d'utilisation de sources dans l'industrie et dans la recherche (détails au chapitre 8).

FIGURE 13.1
RÉPARTITION DES TITULAIRES DE PERMIS DE RADIO-ISOTOPES



RÉGLEMENTATION DE LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS

La production d'énergie nucléaire, l'extraction et le raffinage de l'uranium ainsi que toutes autres activités nucléaires produisent des déchets radioactifs. Ces déchets peuvent varier du combustible épuisé, qui est très radioactif, à des chiffons légèrement radioactifs qui ont servi à nettoyer un déversement d'eau contaminée. La CCEA réglemente la gestion des déchets radioactifs pour s'assurer qu'ils ne constituent aucun danger pour la santé ou la sécurité des personnes, ou pour l'environnement.

Les déchets radioactifs de courte période sont peu préoccupants car ils ne restent pas longtemps radioactifs. Par exemple, le technétium 99^{m}, très utilisé dans les hôpitaux pour diagnostiquer certaines maladies, a une période de six heures. Cela signifie qu'après une semaine, son activité sera réduite à quatre milliardièmes (4×10^{-9}) de sa valeur initiale.

Certains déchets radioactifs contiennent des radionucléides qui ont de longues périodes. Ils doivent donc être gérés de façon à ne pas poser de problèmes aux générations futures. Le combustible épuisé des réacteurs est très radioactif et contient des radionucléides de très longue période. Il est actuellement stocké dans l'eau de grandes piscines sur les sites des réacteurs ou dans des contenants en acier soudés, à l'intérieur de «silos» en béton (figure 13.2). Ces endroits sont sûrs, mais il s'agit de solutions provisoires en attendant que la CCEA évalue complètement et approuve un dépôt qui permettra d'isoler à long terme les déchets de la biosphère.

TRANSPORT DES SUBSTANCES RADIOACTIVES

La CCEA réglemente l'emballage, les préparatifs d'expédition et la réception des substances radioactives en appliquant le *Règlement sur l'emballage des matières radioactives destinées au transport*. En outre, la CCEA collabore avec Transports Canada à la réglementation du transport des matières radioactives en vertu de la *Loi sur le transport des marchandises dangereuses*.

Les envois de matières radioactives peuvent se faire dans des emballages approuvés ou selon des arrangements spéciaux au cas par cas. Pour être approuvé, l'emballage doit satisfaire à des normes de performance établies qui sont très rigoureuses pour le transport des matières hautement radioactives. Ce type d'emballage doit passer avec succès une série d'essais : chocs violents, exposition au feu et immersion dans l'eau. Des emballages ainsi certifiés dans certains pays ont résisté au choc d'une locomotive se déplaçant à 165 km/h.

Environ 750 000 colis contenant des matières radioactives sont transportés chaque année au Canada. La fréquence des incidents ou des accidents est inférieure à un par 20 000 envois, et ce n'est que dans 10 % environ de ces cas qu'il y a libération de substance radioactive. Les déversements accidentels de grandes quantités de substance radioactive sont très rares et, jusqu'à ce jour, personne n'a subi de lésions à la suite d'une exposition à des rayonnements.

RÉSULTATS DE LA RÉGLEMENTATION

La CCEA surveille l'utilisation des matières radioactives et, le cas échéant, elle poursuit les titulaires de permis qui contreviennent aux règlements ou aux conditions de leur permis. Entre le 1er avril 1991 et le 31 mars 1992, sur 90 000 contrôles de travailleurs, on a relevé 11 cas où la dose de rayonnement cumulée dépassait les limites réglementaires. Durant la même période, 13 poursuites ont été entamées. Les doses cumulées dépassant les limites réglementaires se répartissent comme suit :

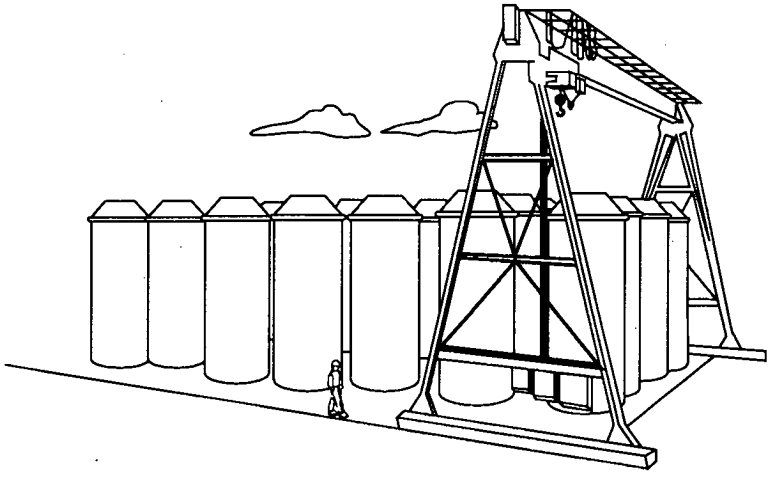
- cinq doses supérieures à la limite trimestrielle,
- trois doses supérieures à la limite annuelle au corps entier,
- une dose supérieure à la limite pour les extrémités,
- une dose supérieure à la limite annuelle pour la population,
- une dose à l'étude.

Une dose qui dépasse la limite réglementaire ne signifie pas qu'il y a eu lésion, mais uniquement que le risque de danger est plus grand. Pour qu'il y ait lésion immédiate ou à court terme, il faut que la dose soit très élevée, ce qui est très rare au Canada. Cela s'est déjà produit il y a plusieurs années lorsqu'un radiographe imprudent s'est brûlé les doigts en manipulant une source radioactive.

Des études portant sur des préposés à des réacteurs nucléaires n'ont révélé aucune incidence excessive de maladies, y compris le cancer. Toutefois, des études sur les mineurs de l'Ontario ont révélé un excès significatif de cancers du poumon chez les mineurs d'uranium. Cet excès devrait tôt ou tard disparaître aux faibles niveaux actuels d'exposition.

Un autre critère important de succès d'une réglementation est la prévention des accidents dans les installations nucléaires qui pourraient entraîner une exposition de la population à des rayonnements. Les réacteurs nucléaires sont particulièrement préoccupants en raison de la possibilité de déversements accidentels de grandes quantités de matière radioactive. Jamais au Canada n'a-t-on encore signalé un incident mettant en cause un réacteur nucléaire, au cours duquel une personne aurait reçu une dose de rayonnement dépassant la limite réglementaire.

FIGURE 13.2
CONTENANTS DE DÉCHETS RADIOACTIFS
POUR LE STOCKAGE PROVISOIRE DU COMBUSTIBLE ÉPUISÉ



CHAPITRE 14

AUTRES SOURCES D'INFORMATION

De nombreuses organisations nationales et internationales fournissent de l'information sur le rayonnement et sur ses effets sur l'organisme humain. On trouvera ci-après la liste de diverses sources qui publient de l'information détaillée sur les sujets dont il a été question dans la présente publication.

SOURCES INTERNATIONALES

COMMISSION INTERNATIONALE DE PROTECTION RADIOLOGIQUE (CIPR)

La CIPR est le principal organisme international proposant des normes sur la radioprotection. Elle publie dans les *Annals of the ICRP* des études détaillées sur les fondements scientifiques de ses recommandations. Les annales sont publiées par Pergammon Press, Headington Hill Hall, Oxford, 0X3 0BW, Royaume-Uni.

COMITÉ DES NATIONS UNIES POUR L'ÉTUDE DES EFFETS DES RAYONNEMENTS IONISANTS

Ce comité, mieux connu sous le sigle UNSCEAR, a été créé par l'Assemblée générale des Nations Unies à sa dixième session, en 1955. Il est le principal organisme international d'étude des effets du rayonnement. Il publie de substantielles études sur les niveaux de rayonnement présents dans le monde et originant de toutes les sources connues ainsi que sur l'état actuel de la connaissance sur les effets biologiques du rayonnement. Le dernier rapport, publié en 1988, renferme également une synthèse de l'abondante information issue de nombreuses parties du monde sur les niveaux de la radioactivité créés par l'accident de Tchernobyl. On peut obtenir ce rapport dans les librairies ou auprès des Nations Unies, Section des ventes, New York, N.Y.

AUTRES AGENCES DES NATIONS UNIES

La principale source d'information est l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), de Vienne en Autriche, qui produit une multitude de rapports sur tous les aspects de l'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire, dont bon nombre décrivent des méthodes recommandées de sécurité. L'Agence est chargée d'indexer et de résumer les données sur les sciences nucléaires et la radioprotection figurant au Système international de documentation nucléaire (INIS). On peut obtenir les publications de l'AIEA auprès de

la Division des publications, Agence internationale de l'énergie atomique, Wagramerstrasse 5, C.P. 100, A-1400 Vienne, Autriche, ou encore auprès de UNIPUB, P.O. Box 433, Murray Hill Station, New York, N.Y., 10157, États-Unis.

L'Organisation mondiale de la santé (OMS), l'Organisation internationale du travail (OIT) et l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) publient aussi de l'information sur la radioprotection.

Il existe de nombreuses autres sources d'information, particulièrement de pays d'Europe, de la Commission européenne et des États-Unis. Une bonne part de cette information est constituée de documents scientifiques fouillés destinés aux spécialistes. Nous vous conseillons de les consulter par le biais de votre bibliothèque avant de vous les procurer.

Un guide semblable à la présente publication, mais présentant des données du Royaume-Uni, a été publié par le National Radiological Protection Board (NRPB); on peut se le procurer à l'adresse suivante : Her Majesty's Stationery Office, Publications Centre, P.O. Box 276, Londres, SW8 5DT, Royaume-Uni.

Le NRPB offre également de nombreux rapports sur la sécurité radiologique : National Radiological Protection Board, Chilton, Didcot, Oxon, OX11 0RQ, Royaume-Uni.

SOURCES CANADIENNES

SOURCES GOUVERNEMENTALES

La Commission de contrôle de l'énergie atomique publie des documents sur la réglementation de l'industrie nucléaire et sur la sûreté nucléaire. On peut les obtenir gratis de la Commission de contrôle de l'énergie atomique, C.P. 1046, Ottawa (Ontario) K1P 5S9. Le catalogue annuel de la CCEA répertorie l'ensemble des publications que le grand public peut se procurer. Les commandes peuvent être placées par télécopieur (613-992-2915), par courrier ou téléphone (613-995-5894 ou 1-800-668-5284).

Santé Canada dirige un programme de surveillance radiologique afin de déterminer les niveaux présents dans l'environnement au Canada et évaluer les expositions résultantes de la population. On peut se procurer le rapport annuel de ce programme auprès de la Direction des communications, Santé Canada, 19e étage, Immeuble Jeanne-Mance, Ottawa (Ontario) K1A 0K9. Le ministère publie également de temps à autre des notes d'interprétation sous la forme de documents internes et d'articles pour revues scientifiques. On peut obtenir des tirés à part de ces documents.

Énergie atomique du Canada Limitée (EACL) est la société d'État chargée de la recherche en sciences et techniques nucléaires. Elle publie chaque année une foule de documents sur de nombreux sujets ayant trait aux utilisations

pacifiques de la technologie nucléaire. Un catalogue répertorie ces documents, qu'on peut obtenir sur demande écrite : Énergie atomique du Canada Limitée, Chalk River, Ontario, K0J 1J0.

Environnement Canada, Pêches et Océans Canada, le Conseil national de recherches du Canada et d'autres ministères fédéraux publient de temps à autre des rapports sur des sujets spécialisés.

Des ministères de la plupart des gouvernements provinciaux publient aussi de l'information sur le nucléaire. Le lecteur est prié de communiquer avec les bureaux de ventes des publications des provinces.

Les sociétés d'électricité exploitant des centrales nucléaires (Ontario, Québec et Nouveau-Brunswick) publient des rapports annuels sur leurs activités et sur les quantités de radionucléides présents, dans l'eau, dans l'air et les aliments dans le voisinage de leurs réacteurs.

On peut obtenir cette information aux adresses suivantes :

Directeur, Affaires publiques
Société d'énergie du Nouveau-Brunswick
C.P. 2000
Fredericton (Nouveau-Brunswick)
E3B 4X1

Corporate & Public Affairs
Ontario Hydro
700, avenue University
Toronto (Ontario)
M5G 1X6

Directeur adjoint
Gestion du nucléaire
Hydro-Québec
4900, boul. Bécancour
Bécancour (Québec)
G0X 1GO

SOURCES NON GOUVERNEMENTALES

L'Association nucléaire canadienne (ANC) est l'organisation représentant l'industrie nucléaire au pays. Elle organise des ateliers et des colloques et publie des rapports sur tous les aspects de l'industrie. Elle tient également une assemblée annuelle et des réunions tout au long de l'année sur des sujets spécialisés. On peut obtenir de l'information à l'Association nucléaire canadienne, 144 ouest, rue Front, Bureau 725, Toronto (Ontario), M5J 2G7; téléphone: 1-800-387-4477.

L'Association canadienne de radioprotection (ACRP) est l'organisme scientifique auquel appartiennent de nombreux Canadiens œuvrant dans les divers domaines de la radioprotection. Elle tient une assemblée annuelle et publie un bulletin. Pour de plus amples renseignements, écrire au Secrétariat, 318, rue Lyon, Ottawa (Ontario), K1R 5W6.

Enfin, des commissions fédérales et provinciales ont tenu des audiences publiques sur différents aspects du nucléaire dans diverses provinces, notamment en Ontario, en Saskatchewan et en Colombie-Britannique. Les rapports de ces commissions renferment de précieux renseignements. Les mémoires des groupes opposés au nucléaire et leurs vues sont présentés dans les rapports de ces commissions.

CHAPITRE 15

SYMBOLES ET UNITÉS

UNITÉS HISTORIQUES

La mesure fait partie de notre vie quotidienne, qu'il s'agisse d'une distance parcourue à pied ou en automobile, du volume de biens que nous achetons ou vendons et même de notre poids. Une mesure compte deux éléments : un nombre et une unité. Rouler à 60 ne veut rien dire, à moins que ne soit également précisée l'unité, par exemple à 60 kilomètres à l'heure ou 60 milles à l'heure.

Tout peut servir d'unité, pour autant que ce soit commode et sensé et qu'on se soit entendu sur son utilisation. Quand, dans la Bible, Dieu dit à Noé de construire une arche de 300 coudées de longueur, Noé savait bien ce qu'était une coudée. La coudée est la distance qui sépare le coude de la pointe des doigts. Elle mesure environ 51 cm et est une unité de mesure commode pour le menuisier. L'inconvénient évident de cette unité est qu'elle varie avec la taille du menuisier. D'autres parties du corps constituent également des unités commodes; la main, de largeur d'environ 10 cm, sert encore de nos jours à mesurer la hauteur des chevaux.

La brasse, ancienne mesure de longueur, est la distance séparant l'extrémité des deux bras étendus. Les marins l'ont utilisée pendant des siècles pour mesurer la profondeur de l'eau. Tout comme la marine, de nombreux métiers nous ont laissé des unités aux noms pittoresques. Pensons à l'aune du tisserand, à la corde du bûcheron et... aux bottes de sept lieues du Chat botté.

L'adoption d'unités variées par une foule de pays a conduit à un nombre effarant d'unités. En 1791, l'Académie française simplifiait et uniformisait les unités en adoptant le système métrique. Dans les pays anglo-saxons, ce système a été généralement adopté par les scientifiques, mais non par les ingénieurs et les autres secteurs de la population. Le nombre d'unités utilisées par ces pays s'en est donc trouvé augmenté. La confusion s'est accrue quand le Royaume-Uni a changé la taille de certaines unités, tout en gardant toutefois leurs anciens noms. Quant aux Américains, ils ont conservé à la fois leurs unités et les noms de celles-ci, de sorte que, par exemple, le gallon du Royaume-Uni et du Canada est différent du gallon des États-Unis.

La Conférence générale des poids et mesures est un organisme international fondé il y a presque 100 ans pour promouvoir l'uniformisation des unités de mesure. Réunie en 1960, la Conférence a établi un système, le Système International d'Unités, abrégé SI, qui est basé sur le système métrique. Le SI a été adopté par tous les pays occidentaux, à l'exception des États-Unis. Le Canada l'a fait sien il y a une vingtaine d'années. Les unités SI ne sont pas fondées sur l'expérience humaine courante; elles sont au contraire extrêmement structurées et s'appuient rigoureusement sur des principes de la physique et de la chimie.

UNITÉS DE RAYONNEMENT

Quand les ingénieurs et les scientifiques introduisent une nouvelle mesure et que cette nouvelle mesure se fait au moyen d'unités peu connues, le grand public n'a plus aucun repère pour la juger. Cela s'est produit au Canada quand les unités SI ont été utilisées pour la mesure de la température et que le degré Celsius a remplacé le degré Fahrenheit. Les personnes d'un certain âge qui savaient à quel point il faisait froid à dix degrés sous zéro à l'échelle Fahrenheit n'avaient plus aucune idée de ce que voulait dire 23 degrés sous zéro à l'échelle Celsius. Cette absence de perception caractérise également la radioactivité et le rayonnement ionisant. La modification des unités de mesure officielles de la radioprotection, apportée dans les années 70 pour qu'elles soient harmonisées au nouveau système SI, n'a fait qu'accroître la difficulté. La radioactivité, le rayonnement et la dose de rayonnement sont toutefois partie intégrante de notre vie. Pour bien comprendre ces phénomènes, il est indispensable de se familiariser avec leurs unités et de bien en saisir le sens. Le tableau ci-dessous donne les noms officiels de trois unités SI courantes en radioprotection, ainsi que des anciennes unités correspondantes encore utilisées dans certaines parties de l'Amérique du Nord. En radioprotection, la plus importante de ces unités est le sievert.

UNITÉS UTILISÉES EN RADIOPROTECTION

	UNITÉS SI	ANCIENNES UNITÉS
Dose absorbée	gray (Gy)	rad = 0,01 Gy = 10 mGy
Équivalent de dose Dose effective	sievert (Sv)	rem = 0,01 Sv = 10 mSv
Activité d'une substance radioactive	becquerel (Bq)	curie (Ci) = $3{,}7 \times 10^{10}$ Bq = 37 GBq

L'unité SI de l'activité d'une source radioactive est le becquerel (Bq). L'ancienne unité correspondante est le curie (Ci). Ces deux unités permettent de mesurer la vitesse à laquelle se désintègrent les atomes de la source radioactive.

Le gray (Gy) est l'unité SI servant à mesurer la dose absorbée, soit la quantité d'énergie absorbée par un kilogramme de tissu ou d'une autre matière. Il correspond au rad dans l'ancien système.

Les effets nocifs induits par une certaine quantité de rayonnement dépendent non seulement de la dose absorbée dans les tissus et les organismes des être vivants, mais aussi de la nature du rayonnement absorbé et des organes exposés. Ainsi, l'absorption d'un gray de rayonnement alpha par les poumons a des effets biologiques supérieurs à ceux de l'absorption d'un gray de rayons gamma ou de rayons X par la thyroïde. Il faut donc une autre unité en radioprotection pour prendre en compte la nature du rayonnement et l'organe exposé et ainsi pouvoir faire la somme des effets nocifs de l'exposition aux rayonnements de toutes sortes. Cette unité est le sievert (Sv), son correspondant dans l'ancien système étant le rem. La dose reçue par une personne, mesurée en sieverts, est appelée «dose effective» (le mot dose est utilisé dans ce sens dans la présente publication). Le sievert est l'unité la plus importante et la plus couramment utilisée en radioprotection, puisqu'elle sert à mesurer les effets nocifs des rayonnements. Faire la relation entre le becquerel, le gray et le sievert est complexe; aussi nous laisserons cette question de côté.

Bien qu'elles portent les noms de personnes, les unités du rayonnement ne prennent pas la majuscule, mais leurs symboles, si. Par contre, les unités prennent la marque du pluriel; les symboles, jamais.

SYMBOLES DE LA RADIOPROTECTION

Les symboles sont abondamment utilisés en radioprotection. Les éléments sont habituellement représentés par un symbole, par exemple C pour le carbone, Ba pour le baryum et Pb pour le plomb. Il est également habituel de représenter respectivement le nombre de masse et le numéro atomique par un indice supérieur et par un indice inférieur. Ainsi, le carbone 14 est symbolisé $^{14}_{6}C$, le baryum 140, $^{140}_{56}Ba$, et le plomb, $^{210}_{82}Pb$. Le numéro atomique est fréquemment omis quand il est petit.

SYMBOLES COURAMMENT UTILISÉS EN RADIOPROTECTION

Symbole	Signification
α	particule alpha
β	particule bêta
γ	rayonnement gamma
e	électron
p	proton
n	neutron
eV	électronvolt
A	nombre de masse
Bq	becquerel
Gy	gray
Sv	sievert
E	dose effective
Sv•personne	sievert•personne
Z	numéro atomique
$t_{1/2}$	période

PRÉFIXES SI

Le système SI est extrêmement commode pour l'écriture des très grands nombres et des très petits nombres. Dans les deux cas, l'écriture du nombre peut exiger beaucoup de zéros, par exemple 140 000 000 000. On constatera au passage que c'est un espace, et non la virgule, qui sert à séparer les milliers. C'est la pratique courante dans le SI, la virgule tenant lieu en effet de point décimal en Europe. L'écriture des grands nombres, comme celui ci-dessus, est peu commode. Il est difficile de comparer les nombres écrits de cette façon, car on peut se tromper en comptant les zéros.

L'utilisation des puissances de dix permet d'alléger l'écriture. Ainsi, le symbole 10^3 signifie que dix est multiplié par lui-même trois fois, soit 10 x 10 x 10 = 1000. Le symbole 10^{-3} signifie que un est divisé par 1000, soit 1/(10 x 10 x 10) = 0,001.

De même, 10^6 est un million, ou 10 multiplié par lui-même six fois, et 10^{-6} est un divisé par un million. Il est ainsi plus commode d'écrire $1{,}4 \times 10^{11}$ que 140 000 000 000. Une autre simplification possible dans le SI consiste à se servir de préfixes bien définis. Les préfixes SI et leurs symboles, avec les facteurs de multiplication correspondants, sont donnés au tableau qui suit.

PRÉFIXES SI

Préfixe	Facteur de multiplication	Symbole
exa	10^{18}	E
péta	10^{15}	P
téra	10^{12}	T
giga	10^{9}	G
méga	10^{6}	M
kilo	10^{3}	k
hecto	10^{2}	h
déca	10	da
unité de base	1	-
déci	10^{-1} (un dixième)	d
centi	10^{-2} (un centième)	c
milli	10^{-3} (un millième)	m
micro	10^{-6} (un millionième)	µ
nano	10^{-9}	n
pico	10^{-12}	p
femto	10^{-15}	f
atto	10^{-18}	a

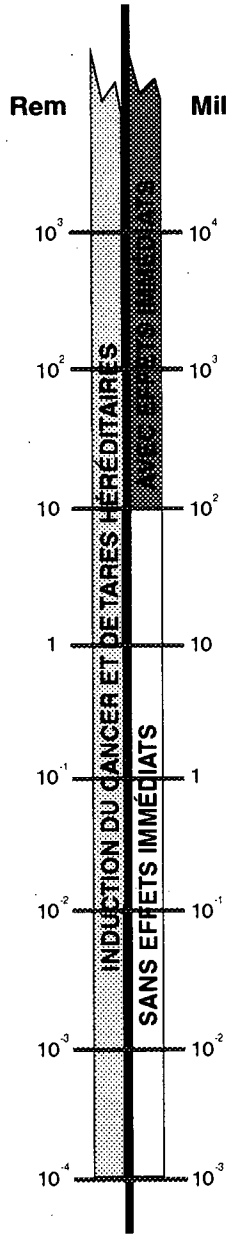
On peut donc écrire 140 000 000 000 Bq comme suit: $1{,}4 \times 10^{11}$ Bq, 140 GBq ou 0,14 TBq.

Les grands préfixes multiplicateurs, comme le téra et l'exa, sont utiles en radioprotection parce que l'unité SI de la radioactivité, le becquerel, est petite et que les quantités rencontrées à l'échelle humaine sont grandes. À l'opposé, l'unité de dose, le sievert, est si grande qu'il est bien commode de pouvoir la diviser en la multipliant par de petits préfixes. Pour bien illustrer la commodité des préfixes, rappelons que l'accident de Tchernobyl survenu en 1986 a dégagé dans l'atmosphère environ 10^{18} Bq (1 EBq) d'iode 131, et que les doses résultantes au Canada ont été de l'ordre de 0,0001 mSv (10^{-7} Sv).

Pour la plupart des situations, le millisievert est l'unité commode de mesure de la dose. Le térabecquerel (TBq) est habituellement l'unité la plus pratique pour mesurer la radioactivité émise dans l'environnement, tandis que le millibecquerel (mBq) est utile pour la mesure des concentrations des substances radioactives. Par exemple, la concentration d'un radionucléide dans un aliment peut être exprimée en mBq/kg, dans l'eau en mBq/L, et dans l'air en mBq/m^3, et la contamination radioactive d'une surface peut se mesurer en kBq/m^2. La figure 15.1 indique les effets de diverses doses de rayonnement sur les personnes, les limites de dose et les doses produites par diverses sources, en unités SI et en unités anciennes.

FIGURE 15.1

DOSES, LIMITES DE DOSE ET EFFETS



- 250 000 — Dose type administrée à la thyroïde en thérapie (équivalent de dose)

DOSE AU CORPS ENTIER

- 6 000 — Mort rapide
- 4 000 — 50 % de survie
- 2 000 — Seuil de la mort rapide
- 500 — Seuil de la nausée
  Seuil de la réduction des leucocytes
- 50 — Limite de dose annuelle des travailleurs (Canada 1994)
- 20 — Limite supérieure quinquennale de la CIPR pour la dose annuelle des travailleurs sous rayonnements
- 5 — Limite de dose annuelle du grand public (Canada 1994)
- 2 — Dose annuelle moyenne attribuable au rayonnement naturel
- 1 — Limite supérieure de la CIPR pour la dose du grand public attribuable aux centrales nucléaires
- 0,05 — Dose maximale vraisemblable à la périphérie d'une centrale nucléaire
- 0,04 — Dose attribuable au rayonnement cosmique pour un vol aller-retour d'une côte à l'autre du Canada
- 0,02 — Radiographie pulmonaire type (R.-U.)
- 0,001 — Dose annuelle moyenne attribuable aux centrales nucléaires

CHAPITRE 16

GLOSSAIRE

Actinides Groupe de 15 *éléments* dont le numéro atomique est compris entre celui de l'actinium (89) et celui du lawrencium (103) inclusivement. Tous ces éléments sont *radioactifs*. Le groupe comprend l'uranium, le plutonium, l'américium et le curium.

Activité Attribut d'une quantité de *radionucléide*. Représente le taux auquel se produisent des transformations nucléaires. Unité : becquerel. Symbole : Bq. 1 Bq = 1 transformation par seconde.

ADN Acide désoxyribonucléique. Composé qui régit la structure et la fonction des cellules et qui est le support matériel de l'hérédité.

Annals of the ICRP Documents publiés par la Commission internationale de protection radiologique, contenant des recommandations et servant de guide en radioprotection.

Arme nucléaire Dispositif explosif tirant sa puissance de la *fission* ou de la *fusion* de *noyaux*, ou des deux mécanismes.

Atome Plus petite partie d'un *élément* qui conserve les propriétés de cet élément.

Becquerel Voir *activité*.

Bombe atomique Voir *arme nucléaire*.

Chromosomes Éléments en forme de bâtonnets contenus dans le *noyau* de chaque cellule du corps. Ils portent les *gènes*, qui sont les facteurs déterminants de l'hérédité. L'être humain possède 23 paires de chromosomes.

Comité BEIR Comité établi par l'U.S. Academy of Sciences, ayant pour mission d'étudier les effets biologiques des rayonnements ionisants et de rendre compte sur la question.

Déchet radioactif Matériau apparemment inutile, contenant des *radionucléides*. Souvent classé, dans l'*industrie nucléaire*, en fonction de l'*activité* ou de la *période*.

Décroissance Diminution de l'*activité* d'une substance radioactive.

Descendants du radon Voir *produits de désintégration du radon*.

Désintégration Transformation spontanée d'un *radionucléide.*

D'origine cosmique Se dit de matières radioactives produites par l'interaction du rayonnement cosmique avec des éléments de la haute atmosphère.

Dose Terme général désignant la quantité de rayonnement reçue. Voir *dose absorbée, dose effective, dose effective collective, dose génétiquement significative* et *équivalent de dose.* Terme souvent utilisé pour désigner la dose effective.

Dose absorbée Quantité d'énergie communiquée par un *rayonnement ionisant* à une masse unitaire de matière, par exemple de tissu. Unité : gray. Symbole : Gy. 1 Gy = 1 joule par kilogramme.

Dose collective Expression souvent utilisée pour désigner la *dose effective collective.*

Dose effective Grandeur obtenue en multipliant les *équivalents de dose* pour différents tissus et organes par le facteur de pondération approprié à chaque tissu ou organe et en additionnant les produits ainsi obtenus. Unité : sievert. Symbole : Sv. Les facteurs de pondération pour les tissus sont représentés sous forme de tableau dans le texte. Souvent, la dose effective est simplement appelée, sous forme abrégée, la dose.

Dose effective collective Somme de toutes les doses effectives individuelles dans une population exposée. Unité : sievert·personne. Symbole : Sv·personne. Souvent appelée, sous forme abrégée, dose collective.

Dose génétiquement significative Dose de rayonnement reçue par les organes reproducteurs avant qu'ils conçoivent des enfants. Unité : sievert. Symbole : Sv (l'unité d'*équivalent de dose*).

Dose seuil Dose de rayonnement au-dessous de laquelle aucun effet n'est observé chez une personne ou un groupe de personnes, ou chez d'autres espèces biologiques, lorsque ces personnes ou espèces sont exposées au rayonnement.

Dosimètre Dispositif servant à mesurer une dose de rayonnement. Un dosimètre individuel est un appareil qui permet d'estimer la *dose effective* reçue par une personne en mesurant la dose en un point du corps.

Dosimètre thermoluminescent (DTL) Dosimètre qui comprend un matériau thermoluminescent, c'est-à-dire un matériau qui, après avoir été exposé à un rayonnement ionisant, émet, lorsqu'il est chauffé, une quantité de lumière proportionnelle à la dose absorbée.

Eau lourde Oxyde de deutérium. Eau dans laquelle la forme ordinaire des atomes d'hydrogène, $^{1}_{1}H$, est remplacée par la forme $^{1}_{2}H$.

Électron Particule élémentaire de faible masse, égale à 1/1836 de la masse d'un proton, et de charge électrique unitaire négative. Il existe aussi des électrons de charge positive, appelés positrons. Voir aussi *particule bêta.*

Électronvolt Unité d'énergie utilisée en physique des rayonnements pour exprimer l'énergie acquise par un électron soumis à une différence de potentiel de 1 volt. Symbole : eV. 1 eV = 1,6 x 10^{-19} joule environ.

Élément Substance dont les *atomes* ont tous le même *numéro atomique.*

Énergie nucléaire Énergie produite par un *réacteur nucléaire.* Dans le texte, elle désigne l'énergie électrique.

Équivalent de dose Grandeur obtenue en multipliant la *dose absorbée* par un facteur de pondération qui permet de tenir compte des différentes capacités des *rayonnements ionisants* à causer des lésions dans les tissus. Unité : sievert. Symbole : Sv. Pour les rayons gamma, les rayons X et les particules bêta, le facteur de pondération est égal à 1, mais pour les particules alpha, il est égal à 20.

Érythème Rougeur de la peau causée par la dilatation de vaisseaux sanguins.

Évacuation Dispersion ou stockage de *déchets radioactifs* dans un milieu quelconque en vue de les y laisser indéfiniment sans intention de les récupérer.

Excitation Processus par lequel un *rayonnement* communique de l'énergie à un *atome* ou à une *molécule* sans causer l'*ionisation.* L'énergie est dissipée sous forme de chaleur dans les tissus. L'excitation peut aussi causer des modifications chimiques.

Facteur de risque *Probabilité* de cancer et de leucémie ou de dommages héréditaires par unité d'*équivalent de dose.* S'applique habituellement aux affections malignes mortelles et aux dommages héréditaires graves. Unité : Sv^{-1}.

Fission Fission nucléaire. Division d'un *noyau* en deux noyaux ou plus, accompagnée de libération d'énergie. Désigne souvent la division d'un noyau d'uranium 235 en deux parties approximativement égales sous l'action d'un *neutron thermique,* accompagnée de l'émission d'autres neutrons.

Fréquence Nombre de cycles complets d'une onde électromagnétique par seconde. Unité : hertz. Symbole : Hz. 1 Hz = 1 cycle par seconde.

Fusion Fusion thermonucléaire. Processus dans lequel deux *noyaux* légers, ou plus, se combinent pour former un noyau plus lourd en libérant de l'énergie. On croit que la fusion est la source de l'énergie du Soleil.

Gènes Unités biologiques qui déterminent l'hérédité. Ils sont disposés le long des *chromosomes.*

Gestion des déchets Surveillance des *déchets radioactifs*, de leur production jusqu'à leur *évacuation*.

Gray Voir *dose absorbée*.

Industrie nucléaire Ensemble des secteurs de l'industrie participant à la production d'*énergie nucléaire*. Au Canada, ces secteurs sont les suivants : extraction et concentration de l'uranium, préparation de combustible destiné aux *réacteurs nucléaires*, exploitation des réacteurs et gestion des *déchets radioactifs* provenant des réacteurs.

Intensité de champ électrique Mesure de la force d'un champ électrique. Unité : volt par mètre. Symbole : Vm^{-1}.

Interaction électrique Force de répulsion exercée entre des charges électriques de même signe ou force d'attraction exercée entre des charges électriques de signes contraires.

Ion *Atome*, groupe d'atomes ou particule subatomique possédant une charge électrique.

Ionisation Processus par lequel un *atome* ou une *molécule* neutre acquiert ou perd une charge électrique. Production d'*ions*.

Isotopes *Nucléides* possédant le même nombre de *protons*, mais des nombres différents de *neutrons*. Isotope n'est pas synonyme de nucléide.

keV Unité de mesure d'énergie, correspondant à 1000 *électronvolts*. L'énergie du rayonnement émis au cours de la désintégration radioactive d'un radionucléide est habituellement mesurée en keV ou en *MeV*.

Laser (Mot formé à partir de l'expression "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation", c'est-à-dire amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement.) Dispositif qui amplifie la lumière et produit habituellement un faisceau de lumière monochromatique intense et extrêmement étroit.

Longueur d'onde Distance qui sépare deux crêtes successives d'une onde électromagnétique se propageant dans un milieu donné. Unité : mètre. Symbole : m.

Lumière visible *Rayonnement électromagnétique* produisant la sensation de vision et se situant entre l'*ultraviolet* et l'*infrarouge* dans le *spectre électromagnétique*.

MeV Unité de mesure d'énergie, correspondant à un million d'*électronvolts*. L'énergie du rayonnement émis au cours de la désintégration radioactive d'un radionucléide est habituellement mesurée en Mev ou en *keV*.

Modélisation Pour ce qui est de l'*évacuation* des *déchets radioactifs*, description, en termes quantitatifs, des processus physiques qui influent sur le déplacement des *radionucléides* dans un milieu.

Modérateur Matériau utilisé dans un *réacteur nucléaire* pour réduire l'énergie et la vitesse des *neutrons* produits par la *fission*.

Molécule Plus petite partie d'une substance pure qui peut exister à l'état libre tout en conservant les propriétés de la substance.

Mutation Modification chimique de l'ADN dans le *noyau cellulaire*. Les mutations produites dans les spermatozoïdes ou les ovaires, ou leurs précurseurs, peuvent entraîner des effets héréditaires chez les descendants. Les mutations produites dans les cellules somatiques peuvent entraîner des effets chez la personne même.

Neutron Particule subatomique ayant approximativement une masse atomique unitaire et ne possédant pas de charge électrique.

Neutrons rapides Par convention, *neutrons* possédant des énergies supérieures à 0,1 MeV. La vitesse correspondante est d'environ 4 x 10^6 mètres par seconde.

Neutrons thermiques *Neutrons* qui ont été ralentis jusqu'à ce qu'ils aient la même énergie thermique moyenne que les *atomes* ou les *molécules* qu'ils traversent. L'énergie moyenne des neutrons aux températures ordinaires est d'environ 0,025 eV, ce qui correspond à une vitesse moyenne de 2,2 x 10^3 mètres par seconde.

Niveau opérationnel (WL) Unité de mesure de la concentration dans l'air de radionucléides de courtes périodes provenant de la chaîne de désintégration qui va du radon 222 au plomb 210 exclusivement. Un WL est la concentration de produits de désintégration du radon de courtes périodes qui représente une énergie potentielle alpha de 0,004 joule (1,3 x 10^5 MeV) par litre d'air.

Niveau opérationnel-mois Unité de mesure de l'exposition à la contamination en suspension dans l'air due à des radionucléides du radon 222 de courtes périodes. Symbole : WLM. Exposition à 1 *niveau opérationnel* pendant un mois (170 heures).

Niveaux d'intervention Niveaux de débit de dose dans des endroits publics, ou niveaux d'activité dans des aliments, auxquels des mesures établies au préalable sont prises afin de réduire les doses de rayonnement reçues par des personnes ou des groupes.

Nombre de masse Total du nombre de *protons* et de *neutrons* contenus dans le *noyau* d'un *atome*. Symbole : A.

Noyau atomique Partie centrale d'un *atome*, n'occupant qu'une faible fraction du volume, contenant la plus grande partie de la masse et portant une charge électrique positive.

Noyau cellulaire Centre de commande de l'unité fondamentale des tissus. Il contient l'*ADN*, un matériau important.

Nucléide Espèce d'*atome* caractérisée par son nombre de *protons* et de *neutrons* et, dans certains cas, par le niveau d'énergie du *noyau*.

Numéro atomique Nombre de *protons* contenus dans le *noyau* d'un *atome*. Symbole : Z.

Ordre de grandeur Valeur exprimée à la puissance de dix près. Facteur de dix.

Paire d'ions Ensemble composé de l'électron et de l'*ion* positif produits lorsqu'un *rayonnement ionisant* réagit avec un atome ou une molécule.

Particule alpha Particule composée de deux *protons* et deux *neutrons*. Émise par certains *radionucléides* pendant leur *désintégration*, ou transformation, *radioactive*.

Particule bêta *Électron* émis à partir du *noyau* d'un *radionucléide*. Une particule bêta de charge positive est appelée *positron*.

Période (radioactive) Temps nécessaire pour que l'*activité* d'un *radionucléide* diminue de moitié par *désintégration* radioactive. Symbole : $t_{1/2}$.

Photon La plus petite quantité (quantum) de *rayonnement électromagnétique* qui puisse exister.

Positron Voir *particule bêta*.

Probabilité Chance mathématique qu'un événement donné se produise.

Produit de désintégration *Nucléide* ou *radionucléide* produit par *désintégration*. Il peut être produit directement à partir d'un radionucléide ou être produit à la suite d'une série de désintégrations successives par l'intermédiaire de plusieurs radionucléides.

Produits de désintégration du radon Radionucléides de la chaîne de désintégration commençant par le radon 222. Les radionucléides sont fixés suivant diverses proportions à des particules de poussière. On les appelle aussi parfois *produits de filiation du radon* ou *descendants du radon*.

Produits de filiation du radon Voir *produits de désintégration du radon*.

Proton Particule élémentaire ayant approximativement une masse atomique unitaire et possédant une charge électrique positive unitaire.

Radical libre Groupe d'*atomes* qui est normalement combiné à d'autres atomes, mais qui peut parfois se présenter seul. En général, chimiquement très réactif.

Radioactif Qui possède la propriété de *radioactivité.*

Radioactivité Propriété d'émission spontanée de *rayonnement ionisant* que possèdent les *radionucléides.*

Radiobiologie Étude des effets du *rayonnement ionisant* sur les êtres vivants.

Radio-isotope Atomes radioactifs possédant le même *numéro atomique* mais des *nombres de masse* différents.

Radionucléide *Nucléide* instable qui émet un *rayonnement ionisant.*

Radioprotection Science et applications ayant pour but de limiter les dommages causés aux être humains par le *rayonnement.*

Rayon gamma Quantité discrète d'énergie électromagnétique, sans masse ni charge. Émis par le noyau de certains *radionucléides* pendant leur *désintégration* radioactive. (Voir *rayon X.*)

Rayonnement Énergie sous forme d'ondes ou de particules. Dans le texte, le terme rayonnement est souvent utilisé au sens de *rayonnement ionisant,* sauf lorsqu'il y a risque de confusion avec *rayonnement non ionisant.*

Rayonnement électromagnétique Rayonnement qui peut être considéré comme une onde d'énergie électrique et magnétique se propageant dans le vide ou dans un matériau. Exemples : *rayons X, rayons gamma, ultraviolet, lumière visible, infrarouge* et rayonnement radiofréquence.

Rayonnement infrarouge *Rayonnement électromagnétique* pouvant créer la sensation de chaleur, qui se situe entre la *lumière visible* et le rayonnement radiofréquence dans le *spectre électromagnétique.*

Rayonnement ionisant *Rayonnement* qui produit l'*ionisation* dans la matière. Exemples : *particules alpha, particules bêta, rayons gamma, rayons X* et *neutrons.*

Rayonnement non ionisant *Rayonnement* qui ne produit pas d'*ionisation* dans la matière. Exemples : *rayonnement ultraviolet, lumière visible, rayonnement infrarouge* et rayonnement radiofréquence.

Rayonnement ultraviolet Type de *rayonnement électromagnétique* compris entre les *rayons X* et la *lumière visible* dans le *spectre électromagnétique.*

Rayons cosmiques *Rayonnement ionisant* de grande énergie provenant de l'espace extra-atmosphérique. Composition complexe à la surface de la Terre.

Rayon X Quantité discrète d'énergie électromagnétique. Émis lorsque des particules chargées, par exemple des électrons, sont arrêtées par un matériau cible, comme dans un appareil de radiographie. Peut aussi être émis par un atome lorsque des électrons orbitaux sont déplacés au cours de la désintégration radioactive (voir *rayon gamma)*. Utilisé dans le langage courant pour désigner l'enregistrement sur film (radiographie) de l'exposition d'un patient aux rayons X dans le but d'établir des diagnostics médicaux.

Réacteur à eau sous pression *Réacteur thermique* dans lequel l'eau est utilisée comme *modérateur* et comme fluide de refroidissement. Utilise un combustible à oxyde d'*uranium enrichi.*

Réacteur CANDU Nom donné d'après l'expression réacteur CANadien à Deutérium-Uranium. Réacteur dans lequel on utilise de l'oxyde de deutérium (eau lourde) comme modérateur et fluide de refroidissement. Le combustible est de l'oxyde d'uranium. Le réacteur comprend un ensemble de tubes de force qui contiennent le combustible et sont logés dans un réservoir contenant le modérateur sous une faible pression.

Réacteur nucléaire Dispositif dans lequel la *fission* nucléaire peut être maintenue dans une réaction en chaîne auto-entretenue à laquelle participent des *neutrons*. Dans les réacteurs thermiques, la fission est produite par des *neutrons thermiques;* dans les réacteurs rapides, elle est produite par des *neutrons rapides.*

Réacteur thermique Voir *réacteur nucléaire.*

Retombées On appelle habituellement ainsi les *radionucléides* produits par des *armes nucléaires* et déposés de l'atmosphère à la surface de la Terre. On utilise aussi ce terme pour désigner le transfert de radionucléides de l'atmosphère à la surface de la Terre à partir, par exemple, d'un panache de substances radioactives à l'état gazeux produit à la suite d'un accident.

Risque *Probabilité* de blessures, préjudices ou dommages.

Sievert Voir *dose effective.*

Sievert·personne Voir *dose effective collective.*

Spectre électromagnétique Ensemble de tous les rayonnements électromagnétiques, formant un continuum par ordre de fréquence croissante ou de longueur d'onde décroissante.

Stable Se dit d'un atome qui ne subit pas de désintégration ou de transformation radioactive.

Sûreté des réacteurs Champ d'activités faisant appel à des techniques, des applications et des méthodes en vue de prévenir les accidents de réacteurs.

Système de réglage Système qui règle la puissance produite par un réacteur en conditions normales.

Systèmes spéciaux de sûreté
Systèmes installés sur un réacteur pour prévenir les emballements de puissance et maintenir les barrières destinées à prévenir le rejet de substances radioactives à partir du réacteur.

Transuranien Se dit d'un élément radioactif produit artificiellement et dont le *numéro atomique* est supérieur à celui de l'uranium.

Tube compteur de Geiger Enveloppe de verre ou de métal contenant un gaz sous faible pression et deux électrodes. Un *rayonnement ionisant* cause des décharges qui sont enregistrées sous forme d'impulsions électriques dans un compteur. Le nombre d'impulsions par seconde est fonction de l'intensité du rayonnement ionisant.

Uranium Élément radioactif naturel. Contient 99,282 % d'uranium 238, 0,712 % d'uranium 235 et 0,006 % d'uranium 234 en poids.

Uranium appauvri Uranium dont la teneur en *isotope* uranium 235 a été réduite au-dessous de la valeur observée dans l'uranium naturel, c'est-à-dire au-dessous de 0,7 % en poids.

Uranium enrichi Uranium dont la teneur en *isotope* uranium 235 a été augmentée au-dessus de la valeur observée dans l'uranium naturel, c'est-à-dire au-dessus de 0,7 % en poids.

WLM Voir *niveau opérationnel-mois*.

ISBN 0-660-94978-4