

Rédacteur  
*Robert N. Cherry, Jr.*

### Table des matières

Introduction .....	<i>Robert N. Cherry, Jr.</i>	48.2
La biologie des rayonnements .....	<i>Arthur C. Upton</i>	48.5
Les sources de rayonnements ionisants .....	<i>Robert N. Cherry, Jr.</i>	48.12
La radioprotection et la conception des lieux de travail .....	<i>Gordon M. Lodde</i>	48.18
La protection radiologique .....	<i>Robert N. Cherry, Jr.</i>	48.27
La planification d'urgence et la gestion des accidents dus aux rayonnements.....	<i>Sydney W. Porter, Jr.</i>	48.34

## ● INTRODUCTION

*Robert N. Cherry, Jr.*

Les rayonnements ionisants sont partout dans l'univers. Ils viennent de l'espace sous forme de rayons cosmiques. Ils sont émis dans l'atmosphère par le radon et ses descendants radioactifs. Les radio-isotopes naturels pénètrent tous les tissus vivants et y restent. Aucun être vivant ne peut y échapper. En fait, l'évolution de toutes les espèces de la planète s'est faite grâce à la présence de rayonnements ionisants. Même si les effets biologiques de petites doses de rayonnement ne sont pas immédiatement apparents chez des humains exposés, il n'y a pas de doute qu'à partir d'une certaine intensité les rayonnements ionisants sont nuisibles. Leurs effets sont bien connus, tant en nature qu'en gravité.

S'il est vrai que les rayonnements ionisants peuvent être dommageables, ils ont, par contre, de multiples applications utiles. L'uranium radioactif produit de l'électricité dans les centrales nucléaires de nombreux pays. En médecine, les rayons X permettent de prendre des radiographies qui servent à diagnostiquer des maladies et des lésions internes. Les spécialistes de la médecine nucléaire se servent de produits radioactifs comme traceurs pour former des images détaillées de structures internes et pour étudier le métabolisme. Il existe des produits radiopharmaceutiques permettant de traiter des maladies telles que l'hyperthyroïdie et le cancer. Les radiothérapeutes ont recours aux rayons gamma, aux faisceaux de pions et d'électrons, aux neutrons et à d'autres types de rayonnement pour traiter les tumeurs cancéreuses. Les ingénieurs utilisent des éléments radioactifs pour faire des diagraphies des puits de pétrole et se servent de nucléodensimètres pour mesurer la densité des sols. Les radiographes industriels emploient les rayons X en contrôle de la qualité pour observer la structure interne des produits manufacturés. Dans les immeubles et les avions, les panneaux indiquant les sorties et les issues de secours portent des inscriptions au tritium radioactif qui les rend visibles dans l'obscurité en cas de panne de courant. D'innombrables logements et locaux commerciaux sont protégés par des détecteurs de fumée fonctionnant à l'américium radioactif.

Par leurs nombreuses applications, les rayonnements ionisants et les matières radioactives améliorent notre qualité de vie et aident la société de bien des façons. Bien sûr, nous devons toujours comparer les avantages de chaque application à ses risques. Ces derniers ne concernent pas seulement les travailleurs qui manipulent directement les rayonnements ou les substances radioactives, mais aussi le public, les générations futures et l'environnement. Au-delà des considérations politiques et économiques, lorsqu'il s'agit d'utiliser les rayonnements ionisants, il faut toujours que les avantages l'emportent de loin sur les risques.

### Les rayonnements ionisants

Les rayonnements ionisants consistent en particules, y compris des photons, qui arrachent des électrons à des atomes et des molécules. Toutefois, certains rayonnements d'énergie relativement faible, comme les rayons ultraviolets, peuvent être ionisants dans des conditions particulières. Pour les distinguer des rayonnements qui provoquent toujours l'ionisation, on définit un seuil arbitraire d'énergie, en général 10 kiloélectronvolts (keV), à partir duquel les rayonnements sont dits ionisants.

Les rayonnements directement ionisants consistent en particules chargées: électrons énergétiques (parfois appelés négatons), positons, protons, particules alpha, mésons chargés, muons et ions lourds (atomes ionisés). Les rayonnements de ce type agissent sur la matière en vertu de la loi de Coulomb, leur charge attirant ou repoussant les électrons qui gravitent autour des atomes et des molécules.

Les rayonnements indirectement ionisants consistent en particules neutres; les plus courants étant les photons de plus de 10 keV (rayons X et gamma) et tous les neutrons.

Les photons des rayons X et gamma provoquent l'ionisation de la matière d'au moins trois manières différentes:

1. Les photons de faible énergie agissent essentiellement par effet photoélectrique, chacun d'eux cédant toute son énergie à un électron, qu'il détache de l'atome ou de la molécule. Le photon incident disparaît.
2. Les photons d'énergie intermédiaire agissent surtout par effet Compton: photons et électrons entrent essentiellement en collision en tant que particules. Le photon poursuit sa course dans une direction différente avec une énergie réduite, tandis que l'électron libéré s'éloigne après avoir acquis le reste de l'énergie du photon (moins l'énergie de liaison de l'électron à l'atome ou à la molécule).
3. La production de paires n'est possible qu'en présence de photons dont l'énergie dépasse 1,02 MeV (toutefois, à cette valeur, l'effet Compton continue à dominer, la production de paires ne devenant prépondérante qu'à des valeurs d'énergie supérieures). Le photon se désintègre, laissant à sa place une paire électron-positon (ce qui ne se produit qu'au voisinage d'un noyau, par suite du principe de la conservation de l'impulsion et de l'énergie). L'énergie cinétique totale de la paire électron-positon est égale à l'énergie du photon moins la somme des énergies correspondant à la masse au repos de l'électron et du positon (1,02 MeV). Les paires électron-positon poursuivent ensuite leur course en tant que rayonnements directement ionisants. Après avoir perdu une partie de son énergie cinétique, le positon finit par rencontrer un électron, ce qui entraîne l'annihilation des deux particules avec émission (en général) de deux photons de 0,511 MeV d'énergie à 180 degrés l'un de l'autre.

Un photon donné peut produire n'importe laquelle des formes d'ionisation mentionnées ci-dessus, sauf que la production de paires n'est possible que si son énergie est supérieure à 1,02 MeV. L'énergie du photon et la matière sur laquelle il agit déterminent le genre d'ionisation le plus susceptible de se produire.

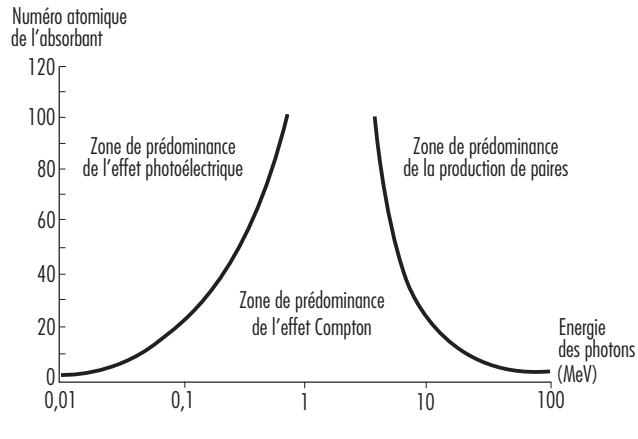
La figure 48.1 montre les régions dans lesquelles chaque type d'interaction domine en fonction de l'énergie du photon et du numéro atomique de la cible.

Les interactions les plus courantes des neutrons sont les chocs inélastiques, la capture de neutrons (ou activation) et la fission. Il s'agit dans tous les cas d'interactions avec des noyaux. A la suite d'un choc inélastique avec un neutron, un noyau passe à un niveau supérieur d'énergie. Il peut libérer cette énergie en émettant un rayonnement gamma, une particule bêta ou les deux. En cas de capture du neutron, le noyau touché peut absorber le neutron incident et libérer de l'énergie sous forme de rayons X ou gamma, de particules bêta ou les deux. Les particules secondaires provoquent ensuite l'ionisation, comme on l'a expliqué plus haut. Dans le cas de la fission, un noyau lourd absorbe le neutron incident puis se divise en deux noyaux plus légers qui sont presque toujours radioactifs.

### Les quantités, les unités et les définitions correspondantes

La Commission internationale des unités et mesures radiologiques (International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU)) élabore des définitions officielles acceptées à l'échelle internationale des quantités et unités de rayonnement et de radioactivité. La Commission internationale de protection radiologique (CIPR) formule également les normes de définition et d'utilisation des diverses quantités et unités employées en radioprotection. Nous présentons dans ce qui suit une description de

Figure 48.1 • Importance relative des trois principales formes d'interaction des photons avec la matière



quelques-unes des quantités, unités et définitions d'utilisation courante dans ce domaine.

**Activité.** Cette quantité représente le nombre de transformations radioactives par unité de temps à partir d'un niveau d'énergie donné, selon la formule :

$$A = \frac{dN}{dt}$$

A étant l'activité et dN le nombre probable de transformations radioactives spontanées à partir du niveau d'énergie donné dans l'intervalle de temps dt. L'activité est liée au nombre N de noyaux radioactifs par la formule :

$$A = \lambda N$$

dans laquelle λ est la constante de désintégration. L'activité s'exprime en secondes inverses (s<sup>-1</sup>), l'unité spécifique étant le becquerel (Bq).

**Constante de désintégration (λ).** Pour un radionucléide donné, la constante de désintégration (également dite *constante radioactive*) est

la probabilité par unité de temps qu'une transformation radioactive se produise. La constante de désintégration s'exprime en secondes inverses (s<sup>-1</sup>). Elle est liée à la période radioactive t<sub>1/2</sub> d'un radionucléide par la formule :

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \approx \frac{0,693}{t_{1/2}}$$

La constante de désintégration λ est liée à la vie moyenne τ d'un radionucléide par la formule :

$$\lambda = \frac{1}{\tau}$$

L'activité A(t) et le nombre de noyaux radioactifs N(t) peuvent être exprimés en fonction du temps par les formules A(0)e<sup>-λt</sup> et N(0)e<sup>-λt</sup>, respectivement.

**Dose absorbée.** C'est la quantité fondamentale de la dosimétrie des rayonnements ionisants. Il s'agit essentiellement de l'énergie que les rayonnements ionisants cèdent à la matière par unité de masse. La formule de la dose absorbée est la suivante :

$$D = \frac{d\epsilon}{dm}$$

D étant la dose absorbée et de l'énergie moyenne cédée à la matière de masse dm. La dose absorbée s'exprime en joules par kilogramme (J kg<sup>-1</sup>), l'unité spécifique étant le gray (Gy).

**Effet biologique déterministe.** C'est l'effet biologique des rayonnements ionisants dont la probabilité est nulle lorsque la dose absorbée est petite, mais passe très rapidement à l'unité (100%) au-delà d'un certain niveau de dose absorbée (seuil). L'induction d'une cataracte est un exemple d'effet biologique déterministe.

**Effet biologique stochastique ou probabiliste.** C'est un effet biologique des rayonnements ionisants, dont la probabilité augmente avec la dose absorbée, vraisemblablement sans qu'il existe un seuil, mais dont la gravité est indépendante de cette dose. Le cancer est un exemple d'effet biologique stochastique.

**Efficacité biologique relative (EBR).** L'EBR d'un rayonnement par rapport à un autre est le rapport inverse des doses absorbées produisant le même degré d'un résultat biologique défini.

**Equivalent de dose.** L'équivalent de dose H<sub>T</sub> est la dose absorbée en moyenne pour tout un tissu ou organe (par opposition à la dose absorbée en un point) et pondérée en fonction du facteur de qualité du rayonnement considéré. C'est une quantité relevant de la radioprotection, qu'il ne convient donc pas d'utiliser dans le cas

Figure 48.2 • Facteurs de pondération des rayonnements pour les neutrons (la courbe pointillée doit être considérée comme une approximation)

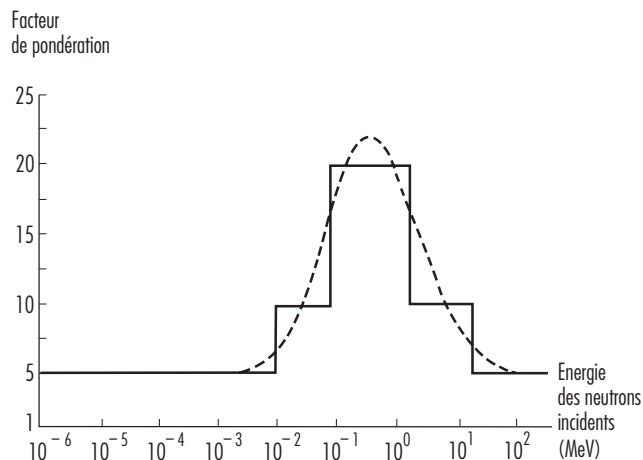


Tableau 48.1 • Facteurs de pondération des rayonnements  $w_R$ <sup>1</sup>

Type de rayonnement et gamme d'énergie	$w_R$
Photons, toutes énergies	1
Electrons et muons, toutes énergies <sup>2</sup>	1
Neutrons, énergie <10 keV	5
10 keV à 100 keV	10
>100 keV à 2 MeV	20
>2 MeV à 20 MeV	10
>20 MeV	5
Protons (sauf protons de recul), énergie >2 MeV	5
Particules alpha, fragments de fission, noyaux lourds	20

<sup>1</sup> Toutes les valeurs se rapportent au rayonnement incident sur le corps ou, dans le cas des sources internes, au rayonnement émis à partir de la source. <sup>2</sup> A l'exception des électrons Auger émis par des noyaux liés à l'ADN.

Tableau 48.2 • Facteurs de pondération des tissus  $w_T$ <sup>1</sup>

Tissu ou organe	$w_T$
Gonades	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
Œsophage	0,05
Thyroïde	0,05
Peau	0,01
Surface des os	0,01
Autres tissus et organes	0,05 <sup>2, 3</sup>

<sup>1</sup> Ces valeurs ont été calculées pour une population de référence composée d'un nombre égal d'hommes et de femmes dans une large fourchette d'âge. Dans la définition de la dose efficace, les valeurs s'appliquent aux travailleurs, à l'ensemble de la population et aux deux sexes. <sup>2</sup> Pour fins de calcul, la catégorie «Autres tissus et organes» comprend ce qui suit: surrénales, cerveau, côlon ascendant supérieur, intestin grêle, reins, muscles, pancréas, rate, thymus et utérus. Cette liste inclut les organes qui peuvent être sélectivement irradiés. Certains de ces organes sont connus comme susceptibles d'induction de cancer. <sup>3</sup> Dans les cas exceptionnels où un seul des tissus ou organes de la catégorie «Autres tissus et organes» reçoit un équivalent de dose supérieur à la plus haute dose dans l'un quelconque des douze organes dont le facteur de pondération est défini, on lui attribuera un facteur de pondération de 0,025 et on attribuera un facteur de pondération de 0,025 à la dose moyenne des autres tissus et organes de cette même catégorie.

des doses absorbées élevées reçues en un laps de temps relativement court. L'équivalent de dose est exprimé par la formule:

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

$D_{T,R}$  étant la dose absorbée moyenne pour tout tissu ou organe T attribuable au rayonnement R, et  $w_R$  le facteur de pondération du rayonnement. L'équivalent de dose est exprimé en joules par kilogramme ( $J kg^{-1}$ ), l'unité spécifique étant le sievert (Sv).

*Équivalent de dose efficace.* L'équivalent de dose efficace E est la somme des équivalents pondérés de dose dans tous les tissus ou organes du corps. C'est une quantité relevant de la radioprotection, qu'il ne convient donc pas d'utiliser dans le cas de doses absorbées élevées reçues en un laps de temps relativement court. Elle est exprimée par la formule:

$$E = \sum_T w_T H_T$$

$w_T$  étant le facteur de pondération pour le tissu et  $H_T$ , l'équivalent de dose pour le tissu T. La dose efficace s'exprime en joules par kilogramme ( $J kg^{-1}$ ), l'unité spécifique étant le sievert (Sv).

*Facteur de pondération des rayonnements.* Il s'agit d'un nombre  $w_R$  qui, pour un type donné et une énergie donnée d'un rayonnement R, est représentatif des valeurs de l'efficacité biologique relative avec laquelle ce rayonnement peut provoquer des effets stochastiques à faible dose. Les valeurs de  $w_R$  sont liées au transfert linéique d'énergie TLE ou TEL selon les publications. Elles sont indiquées dans le tableau 48.1. La figure 48.2 illustre la relation entre  $w_R$  et le TLE dans le cas des neutrons.

*Facteur de pondération des tissus  $w_T$ .* Nombre représentant la contribution du tissu ou de l'organe T au détriment total dû à l'ensemble des effets stochastiques résultant d'une irradiation uniforme de tout le corps. La raison d'être de ce facteur est que la probabilité

### Réglementation sur la radioprotection en Europe

L'étendue des sujets relatifs aux rayonnements ionisants traités dans ce chapitre permet au lecteur de découvrir la plupart des problèmes posés par la protection radiologique et l'invite à rechercher des compléments d'information dans des ouvrages spécialisés.

Les lecteurs francophones souhaiteront prendre connaissance des directives EURATOM auxquelles chaque pays de l'Union européenne (UE) doit se soumettre; ces directives sont inspirées des recommandations de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) que les auteurs ont souvent rappelées tout au long du texte.

A toutes fins utiles, on retiendra que dès le 1<sup>er</sup> mai 2000, la nouvelle directive 96/29 EURATOM aura dû être mise en application dans tous les pays concernés. Elle fixe «les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants» (CCE, 1996).

**Bernard Le Guen**

des effets stochastiques dus à un équivalent de dose dépend du tissu ou de l'organe irradié. Un équivalent de dose uniforme appliqué à tout le corps devrait donner une dose efficace numériquement égale à la somme des doses efficaces pour tous les tissus et organes du corps. Par conséquent, la somme de tous les facteurs de pondération des tissus est normalisée à l'unité. Le tableau 48.2 présente les facteurs de pondération pour différents tissus et organes.

*Période radioactive.* La période radioactive (parfois appelée *demi-vie*) est le temps nécessaire pour que l'activité d'un radionucléide donné diminue de moitié. On peut également dire que la période radioactive est égale au temps nécessaire pour que le nombre de noyaux, dans un système radioactif donné, diminue de moitié. L'unité fondamentale est la seconde (s), mais la période est aussi couramment exprimée en heures, en jours et en années. Pour un radionucléide donné, la période  $t_{1/2}$  est liée à la constante de désintégration  $\lambda$  par la formule:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0,693}{\lambda}$$

*Transfert linéique d'énergie.* C'est l'énergie qu'une particule chargée transmet à la matière qu'elle traverse par unité de longueur de la trajectoire suivie. Elle est exprimée par la formule:

$$L = \frac{dE}{dl}$$

L étant le transfert linéique d'énergie et dE, l'énergie moyenne cédée par la particule après avoir franchi la distance dl. Le transfert linéique d'énergie (TLE ou TEL) s'exprime en joules par mètre ( $J m^{-1}$ ).

*Vie moyenne.* La vie moyenne ou durée moyenne de vie est égale au temps moyen pendant lequel un état nucléaire peut survivre avant de subir une transformation qui l'amènera à un niveau d'énergie inférieur avec émission d'un rayonnement ionisant. L'unité fondamentale est la seconde (s), mais la vie moyenne est aussi couramment exprimée en heures, en jours et en années. Elle est liée à la constante de désintégration par la formule:

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

$\tau$  étant la vie moyenne et  $\lambda$ , la constante de désintégration pour un nucléide donné à un niveau d'énergie donné.

## ● LA BIOLOGIE DES RAYONNEMENTS

Arthur C. Upton

Après leur découverte par Röntgen en 1895, les rayons X ont été adoptés si rapidement dans le diagnostic et le traitement des maladies que les lésions dues à une exposition excessive ont presque immédiatement fait leur apparition chez les pionniers du domaine, qui n'étaient pas encore conscients des risques qu'ils encouraient (Brown, 1933). Au début, les lésions consistaient essentiellement en réactions cutanées sur les mains de ceux qui manipulaient les premiers appareils à rayons X. Une dizaine d'années plus tard, beaucoup d'autres lésions étaient signalées, y compris les premiers cancers attribués aux rayonnements (Stone, 1959).

Depuis ces premières constatations, l'étude des effets biologiques des rayonnements ionisants a constamment reçu des impulsions nouvelles du fait de leur utilisation croissante en médecine, en sciences et dans l'industrie, ainsi que dans les applications pacifiques et militaires de l'énergie nucléaire. C'est ce qui explique que les effets biologiques des rayonnements aient fait l'objet d'investigations beaucoup plus approfondies que ceux de tout autre agent extérieur. D'ailleurs, les connaissances radiobiologiques acquises ont beaucoup contribué aux actions entreprises pour protéger la santé humaine contre bien d'autres risques liés à l'environnement.

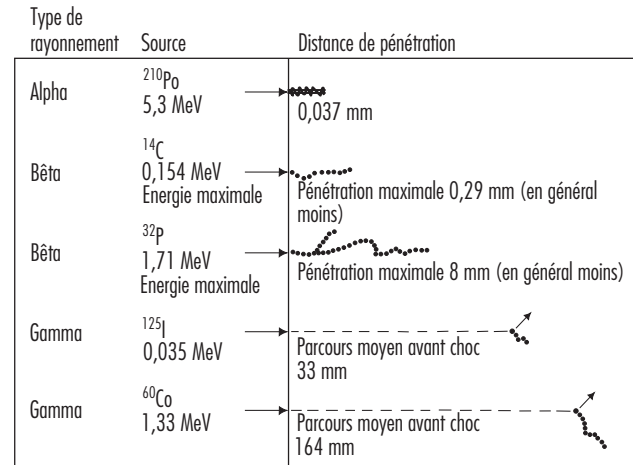
### La nature des effets biologiques et les mécanismes en jeu

*Energie communiquée au milieu.* Contrairement aux autres formes de rayonnement, les rayonnements ionisants peuvent transmettre suffisamment d'énergie localement pour éjecter des électrons des atomes sur lesquels ils agissent. Ainsi, à mesure que les particules ionisantes heurtent de façon aléatoire des atomes et des molécules en passant à travers des cellules vivantes, elles donnent naissance à des ions et à des radicaux libres qui rompent les liaisons chimiques et provoquent d'autres transformations moléculaires qui endommagent les cellules touchées. La répartition spatiale de l'ionisation dépend du facteur de pondération du rayonnement  $w_R$  (voir tableau 48.1 et figure 48.3).

*Effets sur l'ADN.* Le rayonnement peut altérer toute molécule de la cellule, mais l'ADN est la cible biologique la plus critique à cause de la redondance limitée de l'information génétique qu'il contient. Une dose absorbée assez importante pour tuer une cellule moyenne en voie de division — 2 grays (Gy) — suffit pour causer des centaines de lésions dans ses molécules d'ADN (Ward, 1988). La plupart de ces lésions sont réparables, mais celles qui résultent d'un rayonnement ionisant dense (proton ou particule alpha, par exemple) sont en général moins susceptibles de réparation que celles d'un rayonnement moins ionisant (rayons X ou gamma, par exemple) (Goodhead, 1988). Par conséquent, les rayonnements à forte densité d'ionisation (c'est-à-dire à transfert linéique d'énergie (TLE) élevé) ont ordinairement une efficacité biologique relative (EBR) supérieure à celle des rayonnements à faible densité d'ionisation (à TLE peu élevé) pour la plupart des lésions (CIPR, 1991).

*Effets sur les gènes.* Les dommages non réparables ou mal réparés subis par l'ADN peuvent donner lieu à des mutations dont la fréquence semble croître de façon linéaire avec la dose, à environ  $10^{-5}$  à  $10^{-6}$  par locus et par Gy, sans qu'il existe apparemment de seuil (Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations (BEIR V), 1990). Pour certains experts, cette proportionnalité apparente entre le taux de mutation et la dose signifierait que le passage d'une seule particule ionisante à travers l'ADN suffit en principe pour causer une mutation (BEIR V, 1990). Chez les victimes de la catastrophe de Tchernobyl, la relation dose-effet

Figure 48.3 • Pouvoir de pénétration dans les tissus de différents rayonnements ionisants

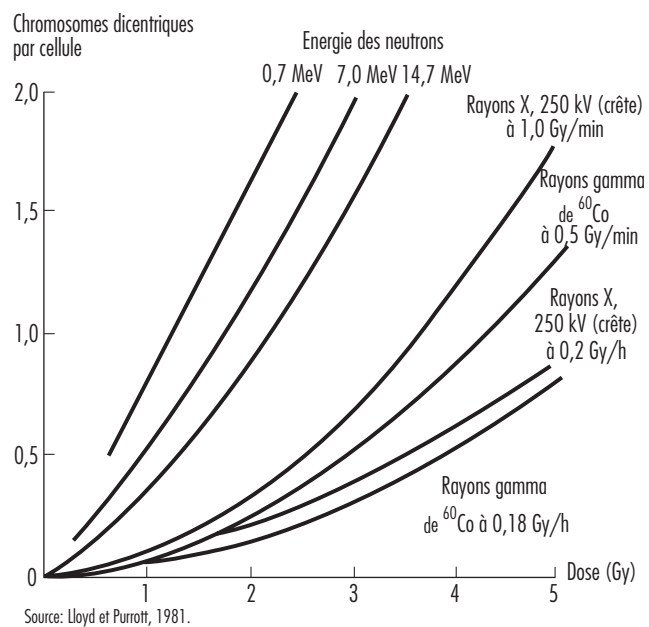


Source: Shapiro, 1972.

observée pour les mutations de la glycophorine dans les cellules de moelle osseuse ressemble étroitement à celle que l'on a mise en évidence chez les survivants des bombardements atomiques (Jensen et coll., 1995).

*Effets sur les chromosomes.* Les dommages causés par les rayonnements ionisants aux matériaux génétiques peuvent également provoquer des modifications du nombre et de la structure des chromosomes, dont on a observé que la fréquence augmentait avec la dose chez les travailleurs exposés aux rayonnements ionisants, les survivants des bombardements atomiques et d'autres

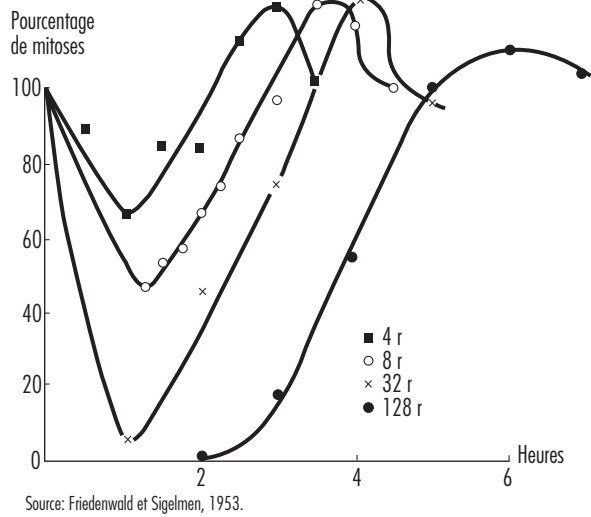
Figure 48.4 • Fréquence des aberrations chromosomiques dicentriques des lymphocytes humains en fonction de la dose, du débit de dose et de la qualité du rayonnement (in vitro)



Source: Lloyd et Purrott, 1981.

48. LES RAYONNEMENTS IONISANTS

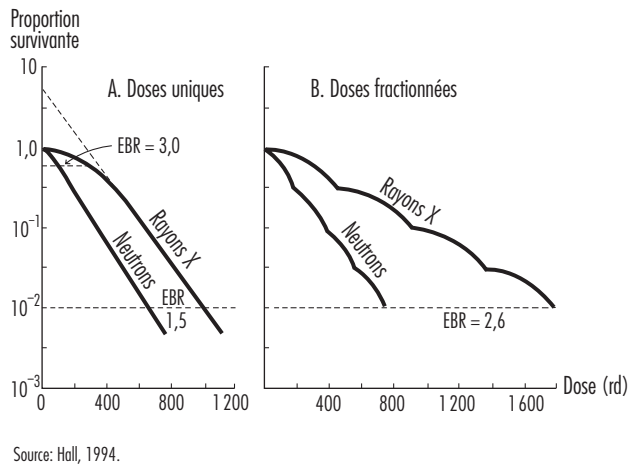
Figure 48.5 • Inhibition mitotique, induite par rayons X, des cellules épithéliales de la cornée du rat



personnes également exposées. La relation dose-effet correspondant aux aberrations chromosomiques des lymphocytes sanguins humains (voir figure 48.4) a été suffisamment bien caractérisée pour constituer un moyen utile de dosimétrie biologique (AIEA, 1986).

**Effets sur la survie des cellules.** L'inhibition de la division cellulaire compte parmi les premiers effets observés de l'irradiation. Elle se manifeste rapidement après l'exposition et varie avec la dose tant dans son degré que par sa durée (voir figure 48.5). Même si l'inhibition de la mitose est le plus souvent transitoire, les dommages que les rayonnements ionisants font subir aux gènes et aux chromosomes peuvent tuer les cellules en cours de division, qui représentent une classe très radiosensible (CIPR, 1984). Mesurée en fonction de la capacité de prolifération, la survie des cellules en cours de division tend à décroître de façon exponentielle avec l'augmentation de la dose, 1 à 2 Gy suffisant en général pour

Figure 48.6 • Courbes caractéristiques dose-survie de cellules de mammifères exposées à des rayons X et à des neutrons rapides



réduire de moitié le nombre de cellules survivantes (voir figure 48.6).

**Effets sur les tissus.** Les cellules matures qui ne sont pas en cours de division sont relativement radiorésistantes, contrairement aux cellules en cours de division, qui sont radiosensibles et peuvent être détruites en nombre suffisant pour causer une atrophie du tissu (voir figure 48.7). La vitesse de ce processus dépend de la dynamique de la population cellulaire dans le tissu en cause. Autrement dit, il est en général beaucoup plus lent dans les organes à régénération cellulaire lente, comme le foie et l'endothélium vasculaire, que dans les organes à régénération cellulaire rapide, comme la moelle osseuse, l'épiderme et la muqueuse intestinale (CIPR, 1984). Il convient de noter en outre que si le volume de tissu irradié est assez petit ou que la dose est accumulée d'une manière assez progressive, la prolifération compensatoire des cellules survivantes peut considérablement réduire la gravité de la lésion.

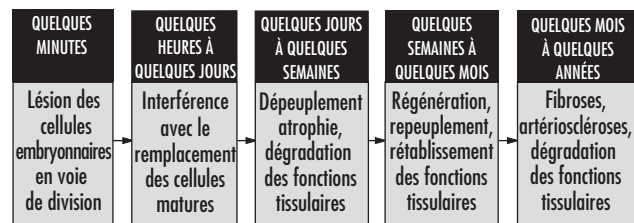
**Les manifestations cliniques des lésions**

**Types d'effets.** Les effets des rayonnements ionisants englobent une vaste gamme de réactions très différentes les unes des autres dans leur relation dose-effet, leurs manifestations cliniques, leur succession dans le temps et les pronostics correspondants (Mettler et Upton, 1995). Par commodité, on subdivise souvent les effets en deux grandes catégories: 1) effets *héréditaires*, ou effets génétiques qui se manifestent chez les descendants des personnes exposées; et 2) effets *somatiques*, qui se manifestent chez les personnes exposées elles-mêmes. Ces derniers comprennent les effets aigus, qui apparaissent peu après l'irradiation, et les effets à long terme (ou différés), qui peuvent se manifester des mois, des années ou même des décennies plus tard.

**Effets aigus.** Les effets aigus des rayonnements ionisants résultent surtout de l'appauvrissement en cellules capables de reproduction dans les tissus irradiés (voir figure 48.7) et ne se manifestent qu'en présence de doses assez importantes pour détruire beaucoup de ces cellules (voir par exemple le tableau 48.3). C'est pour cette raison que l'on considère que ces effets sont de nature *non stochastique* ou *déterministe* (CIPR, 1984, 1991). Il n'en est pas de même des effets mutagènes et cancérogènes des rayonnements, considérés comme des phénomènes stochastiques résultant d'altérations moléculaires aléatoires de cellules individuelles, dont la fréquence croît en fonction linéaire de la dose, indépendamment de tout seuil (BEIR V, 1990; CIPR, 1991).

Les lésions aiguës, qui étaient courantes chez les premiers travailleurs exposés aux rayonnements ionisants et les premiers malades soumis à des traitements de radiothérapie, ont pratiquement disparu par suite de l'amélioration des mesures de sécurité et des méthodes de traitement. Néanmoins, la plupart des malades traités par irradiation de nos jours subissent encore certaines lésions dans des tissus sains. De plus, des accidents graves continuent à se

Figure 48.7 • Succession caractéristique des événements dans la pathogenèse des effets non stochastiques des rayonnements ionisants



Source: Upton, 1996.

produire. En effet, les quelque 285 accidents déclarés (Tchernobyl non compris) survenus dans les centrales nucléaires de différents pays entre 1945 et 1987 ont provoqué l'irradiation de plus de 1 350 personnes, dont 33 ont été mortellement atteintes (Lushbaugh, Fry et Ricks, 1987). A lui seul, l'accident de Tchernobyl a libéré suffisamment de substances radioactives pour nécessiter l'évacuation de dizaines de milliers de personnes et d'animaux de la région environnante. En outre, plus de 200 sapeurs-pompiers et membres d'équipes d'urgence ont été atteints du mal des rayons et 31 en sont morts (Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR), 1988). On ne peut prédire avec certitude les effets à long terme des substances radioactives libérées, mais l'estimation des risques d'effets cancérigènes basée sur des modèles de relation dose-effet sans seuil (que nous examinons plus loin) donne à penser que la population de l'hémisphère septentrional pourrait enregistrer, par suite de l'accident, 30 000 décès supplémentaires par cancer au cours des 70 prochaines années, quoique le nombre de cancers supplémentaires enregistré dans chaque pays sera vraisemblablement trop petit pour être décelable sur une base épidémiologique (United States Department of Energy (USDOE), 1987).

Nettement moins catastrophiques, mais beaucoup plus nombreux que les défaillances de centrales nucléaires, les accidents causés par des sources médicales et industrielles de rayons gamma ont également fait des morts et des blessés. C'est ainsi qu'en 1987 la mise à la ferraille non contrôlée d'une source de radiothérapie au césium 137 à Goiânia, au Brésil, a entraîné l'irradiation de dizaines de personnes non informées, dont quatre sont mortes (UNSCEAR, 1993).

Un examen complet des lésions causées par les rayonnements ionisants dépasserait le cadre du présent article. Toutefois, compte tenu de l'intérêt général d'informations sur les réactions aiguës des tissus les plus radiosensibles, nous croyons utile d'en présenter une brève description dans les paragraphes suivants.

**Peau.** Les cellules de la couche basale de l'épiderme sont particulièrement radiosensibles. Par conséquent, une exposition rapide de la peau à une dose de 6 Sv ou plus provoque un érythème (rougeur) de la zone affectée, qui apparaît en général dans la journée qui suit, dure ordinairement quelques heures, puis est suivi, deux à quatre semaines plus tard, par une ou plusieurs vagues d'un érythème plus profond et plus prolongé, ainsi que par une dépilation (perte de poils ou de cheveux). Si la dose dépasse 10 à 20 Sv, phlyctène, nécrose et ulcération se manifestent dans les deux à quatre semaines, puis sont suivies par une fibrose du derme et du système vasculaire sous-jacent, qui peut mener à l'atrophie et à une deuxième vague d'ulcérations quelques mois ou quelques années plus tard (CIPR, 1984).

**Moelle osseuse et organes lymphoïdes.** Les lymphocytes sont aussi très radiosensibles: une dose de 2 à 3 Sv reçue rapidement par tout le corps peut en tuer suffisamment en quelques heures pour faire chuter la numération lymphocytaire périphérique et compromettre les réactions immunitaires (UNSCEAR, 1988). Également radiosensibles, les cellules hématopoïétiques de la moelle osseuse peuvent diminuer suffisamment en nombre sous l'effet d'une dose comparable pour causer une granulocytopenie et une thrombocytopenie dans les trois à cinq semaines qui suivent. Ces réductions des numérations de granulocytes et de plaquettes peuvent être assez graves après une forte irradiation pour provoquer une hémorragie ou une infection mortelle (voir tableau 48.4).

**Intestin.** Les cellules souches du revêtement épithélial de l'intestin grêle sont extrêmement radiosensibles. Une exposition aiguë à 10 Sv peut en réduire suffisamment le nombre pour dénuder les villosités intestinales en quelques jours (CIPR, 1984; UNSCEAR, 1988). La dénudation d'une importante surface de la muqueuse provoque souvent un syndrome dysentérique fulminant pouvant rapidement évoluer vers le décès de la victime (voir tableau 48.4).

Tableau 48.3 • Dose seuil approximative d'irradiation X fractionnée à visée thérapeutique pouvant causer des détriments non stochastiques cliniquement observables dans différents tissus

Organe ou tissu	Lésion à 5 ans	Dose seuil (Gy)*	Zone irradiée (surface)
Peau	Ulcère, fibrose grave	55	100 cm <sup>2</sup>
Muqueuse buccale	Ulcère, fibrose grave	60	50 cm <sup>2</sup>
Œsophage	Ulcère, rétrécissement	60	75 cm <sup>2</sup>
Estomac	Ulcère, perforation	45	100 cm <sup>2</sup>
Intestin grêle	Ulcère, rétrécissement	45	100 cm <sup>2</sup>
Côlon	Ulcère, rétrécissement	45	100 cm <sup>2</sup>
Rectum	Ulcère, rétrécissement	55	100 cm <sup>2</sup>
Glandes salivaires	Xérostomie	50	50 cm <sup>2</sup>
Foie	Insuffisance hépatique, ascite	35	Organe entier
Rein	Néphrosclérose	23	Organe entier
Vessie	Ulcère, spasmes	60	Organe entier
Testicule	Stérilité permanente	5-15	Organe entier
Ovaire	Stérilité permanente	2-3	Organe entier
Utérus	Nécrose, perforation	>100	Organe entier
Vagin	Ulcère, fistule	90	5 cm <sup>2</sup>
Sein (enfant)	Hypoplasie	10	5 cm <sup>2</sup>
Sein (adulte)	Atrophie, nécrose	>50	Organe entier
Poumon	Pneumonite, fibrose	40	Lobe
Capillaires	Télangiectasie, fibrose	50-60	—
Cœur	Péricardite, pancardite	40	Organe entier
Os (enfant)	Arrêt de la croissance	20	10 cm <sup>2</sup>
Os (adulte)	Nécrose, fracture	60	10 cm <sup>2</sup>
Cartilage (enfant)	Arrêt de la croissance	10	Organe entier
Cartilage (adulte)	Nécrose	60	Organe entier
Système nerveux central (cerveau)	Nécrose	50	Organe entier
Moelle épinière	Nécrose, section	50	5 cm <sup>2</sup>
Ceil	Panophtalmie, hémorragie	55	Organe entier
Cornée	Kératite	50	Organe entier
Cristallin	Cataracte	5	Organe entier
Oreille (interne)	Surdité	>60	Organe entier
Thyroïde	Hypothyroïdie	45	Organe entier
Surrénale	Hypocorticisme	>60	Organe entier
Hypophyse	Hypopituitarisme	45	Organe entier
Muscle (enfant)	Hypoplasie	20-30	Organe entier
Muscle (adulte)	Atrophie	>100	Organe entier
Moelle osseuse	Hypoplasie	2	Organe entier
Moelle osseuse	Hypoplasie, fibrose	20	Localisée
Ganglion lymphatique	Atrophie	33-45	—
Voies lymphatiques	Sclérose	50	—
Fœtus	Mort	2	Organe entier

\* Dose provoquant des effets chez 1 à 5% des personnes exposées.

Source: Rubin et Casarett, 1972.

48. LES RAYONNEMENTS IONISANTS

Tableau 48.4 • Principales formes et caractéristiques du syndrome d'irradiation aiguë

Temps écoulé après l'irradiation	Forme cérébrale (>50 Gy)	Forme gastro-intestinale (10-20 Gy)	Forme hématopoïétique (2-10 Gy)	Forme pulmonaire (>6 Gy sur les poumons)
Premier jour	Nausées Vomissements Diarrhée Céphalées Désorientation Ataxie Coma Convulsions Mort	Nausées Vomissements Diarrhée	Nausées Vomissements Diarrhée	Nausées Vomissements
Deuxième semaine		Nausée Vomissements Diarrhée Fièvre Erythème Prostration Mort		
Troisième à sixième semaine			Faiblesse Fatigue Anorexie Fièvre Hémorragie Dépilation Rétablissement (?) Mort (?)	
Deuxième à huitième mois				Toux Dyspnée Fièvre Douleurs thoraciques Insuffisance respiratoire (?)

Source: UNSCEAR, 1988.

**Gonades.** Les spermatozoïdes matures peuvent survivre à de fortes doses (100 Sv) de rayonnements ionisants, mais les spermatogonies sont tellement radiosensibles qu'une dose de 0,15 Sv appliquée rapidement aux deux testicules suffit pour provoquer l'oligospermie et qu'une dose de 2 à 4 Sv peut entraîner une stérilité permanente. Les ovocytes sont aussi fortement radiosensibles: l'exposition rapide des deux ovaires à une dose de 1,5 à 2 Sv peut causer une stérilité temporaire, pouvant devenir permanente si la dose augmente, selon l'âge de la femme au moment de l'exposition (CIPR, 1984).

**Voies respiratoires.** Les poumons ne sont pas fortement radiosensibles, mais une exposition rapide à une dose de 6 à 10 Sv peut provoquer, un à trois mois plus tard, une pneumonie aiguë dans la zone exposée. Si un important volume de tissu pulmonaire est affecté, la victime peut souffrir d'insuffisance respiratoire dans les semaines suivantes ainsi que de fibrose pulmonaire et de cœur pulmonaire quelques mois ou quelques années plus tard (CIPR, 1984; UNSCEAR, 1988).

**Cristallin.** Les cellules de l'épithélium antérieur du cristallin, qui continuent à se diviser pendant toute la vie, sont relativement radiosensibles. Par conséquent, une exposition rapide du cristallin

à une dose dépassant 1 Sv peut aboutir en quelques mois à la formation d'une opacité polaire postérieure microscopique. De même, une dose de 2 à 3 Sv reçue en une fois dans un court laps de temps ou une dose de 5,5 à 14 Sv accumulée sur une période de quelques mois peut provoquer une grave cataracte (CIPR, 1984).

**Autres tissus.** Par comparaison aux tissus mentionnés ci-dessus, les autres tissus de l'organisme sont en général nettement moins radiosensibles (voir, par exemple, le tableau 48.4). Toutefois, l'embryon constitue une importante exception à cet égard, comme nous le notons plus loin. Il y a également lieu de signaler que la radiosensibilité d'un tissu augmente s'il est en phase de croissance rapide (CIPR, 1984).

**Radiolésions dues à une irradiation totale.** L'exposition rapide d'une importante partie du corps à une dose dépassant 1 Gy peut provoquer le *syndrome de radioexposition aiguë*. Ce syndrome comporte diverses phases: 1) une phase prodromique initiale caractérisée par des symptômes tels que malaises, anorexie, nausées et vomissements; 2) une période de latence; 3) une deuxième phase (principale) de maladie; et enfin 4) soit le rétablissement, soit la mort (voir tableau 48.4). La phase principale de la maladie prend le plus souvent l'une des formes suivantes, selon la localisation prédominante des radiolésions: 1) forme hématologique; 2) forme gastro-intestinale; 3) forme cérébrale; ou 4) forme pulmonaire (voir tableau 48.4).

**Radiolésions localisées.** Contrairement aux manifestations cliniques, en général rapides et spectaculaires, du syndrome de radioexposition aiguë découlant de l'exposition de tout le corps, la réaction à une irradiation très localisée, produite par une source extérieure ou un radionucléide déposé à l'intérieur de l'organisme, tend à se manifester lentement avec peu de symptômes ou de signes extérieurs, à moins que le volume de tissus irradiés ou que la dose ne soient relativement importants (voir, par exemple, tableau 48.4).

**Effets des radionucléides.** Certains radionucléides, comme le tritium (<sup>3</sup>H), le carbone 14 (<sup>14</sup>C) et le césium 137 (<sup>137</sup>Cs), tendent à se répartir dans tout l'organisme, produisant une irradiation totale, tandis que d'autres radionucléides se fixent plutôt dans des organes particuliers, provoquant des lésions très localisées. Le radium et le strontium 90 (<sup>90</sup>Sr), par exemple, se fixent essentiellement dans les os, causant surtout des lésions osseuses, tandis que l'iode radioactif se concentre dans la glande thyroïde, qui est donc la première atteinte (Stannard, 1988; Mettler et Upton, 1995).

### Les effets cancérogènes

**Caractéristiques générales.** La cancérogénicité des rayonnements ionisants, notée dès le début du siècle à cause de la fréquence du cancer de la peau et de la leucémie chez les pionniers de l'étude des radiations (Upton, 1986), a été largement démontrée depuis par l'existence d'une relation entre la dose et les excès de néoplasmes tous types confondus chez les travailleurs ayant manipulé des peintures luminescentes au radium, les mineurs en roche dure travaillant sous terre, les survivants des bombardements atomiques, les malades soumis à des traitements de radiothérapie et les animaux de laboratoire irradiés à titre expérimental (Upton, 1986; BEIR V, 1990).

Les tumeurs bénignes et malignes induites par irradiation mettent le plus souvent des années sinon des décennies à se développer et ne se distinguent en rien des tumeurs attribuables à d'autres causes. De plus, à peu d'exceptions près, il n'a été possible de les déceler qu'après l'application d'équivalents de dose relativement importants (0,5 Sv) et leur développement variait avec le type de néoplasme ainsi qu'avec l'âge et le sexe des personnes exposées (BEIR V, 1990).

**Mécanismes.** Les mécanismes moléculaires de la cancérogenèse due aux radiations ne sont pas encore connus dans tous leurs détails. Toutefois, l'observation d'animaux de laboratoire et de

cultures de cellules a permis de constater que les rayonnements ionisants ont, selon les conditions expérimentales, des effets initiateurs, des effets promoteurs et des effets sur la progression du processus néoplasique (BEIR V, 1990). Leurs effets cancérigènes semblent également comprendre l'activation d'oncogènes ou encore l'inactivation ou la perte d'antioncogènes dans beaucoup sinon la totalité des cas. De plus, ces effets ressemblent énormément à ceux des agents cancérigènes chimiques en ce qu'ils sont modifiables par des hormones, des variables nutritionnelles et d'autres facteurs modificateurs (BEIR V, 1990). Ils peuvent en outre s'ajouter ou s'opposer à ceux des agents cancérigènes chimiques ou agir en synergie avec eux, selon les composés et les conditions d'exposition (UNSCEAR, 1982, 1986).

*Relation dose-effet.* Les données existantes ne suffisent ni à décrire sans ambiguïté la relation dose-incidence pour un type quelconque de néoplasme ni à définir le laps de temps, après l'irradiation, pendant lequel le risque de développement d'une tumeur demeure élevé dans une population exposée. Les risques attribuables à une irradiation de faible niveau ne peuvent donc être estimés que par extrapolation, sur la base de modèles comportant des hypothèses au sujet de ces paramètres (BEIR V, 1990). Parmi les différents modèles dose-effet utilisés pour estimer les risques d'une irradiation de faible niveau, celui qui a été jugé le mieux ajusté aux données existantes a la formule suivante:

$$R(D) = R_0 [1 + f(D) \cdot g(b)]$$

où  $R_0$  représente le risque naturel, selon l'âge, de mourir d'un type donné de cancer;  $D$ , la dose reçue;  $f(D)$ , une fonction de la dose qui est linéaire quadratique dans le cas de la leucémie et linéaire pour les autres types de cancers; et  $g(b)$ , une fonction de risque dépendant d'autres paramètres tels que le sexe, l'âge au moment de l'exposition et le temps écoulé depuis celle-ci (BEIR V, 1990).

De tels modèles sans seuil ont été appliqués aux données épidémiologiques des survivants de Nagasaki et d'Hiroshima et d'autres populations irradiées pour calculer le risque d'apparition de différentes formes de cancers radio-induits (voir, par exemple, tableau 48.5). Il faut cependant interpréter ces estimations avec prudence si l'on cherche à prédire le risque de cancer attribuable à de faibles doses ou à des doses accumulées pendant des semaines, des mois ou des années, parce que les expériences effectuées sur des animaux de laboratoire ont établi que le pouvoir cancérigène des rayons X et gamma peut diminuer d'un ordre de grandeur lorsque l'exposition est répartie sur une longue période. En fait, comme d'autres sources l'expliquent (BEIR V, 1990), les données disponibles n'excluent pas la possibilité de l'existence d'un seuil d'équivalent de dose de l'ordre du millisievert (mSv), en deçà duquel le pouvoir cancérigène d'un rayonnement serait nul.

Il y a également lieu de noter que les tableaux présentés reposent sur les moyennes d'une population et ne s'appliquent donc pas nécessairement à un individu donné. Autrement dit, la prédisposition à certains types de cancer (comme ceux de la thyroïde et du sein) est sensiblement plus élevée chez les enfants que chez les adultes. De plus, elle augmente chez les personnes atteintes de certains troubles héréditaires, comme le rétinoblastome et le carcinome naévoïde basocellulaire (UNSCEAR, 1988, 1994; BEIR V, 1990). En dépit de ces différences de susceptibilité, certains experts ont proposé d'utiliser ces estimations fondées sur les moyennes dans des affaires d'indemnisation, comme base de calcul de la probabilité qu'un cancer chez une personne irradiée ait été causé par l'irradiation en question (NIH, 1985).

*Risque des faibles doses.* Les études épidémiologiques entreprises jusqu'ici pour vérifier si le risque de cancer attribuable à une exposition de faible niveau varie avec la dose selon le modèle présenté ci-dessus n'ont pas été concluantes. Les populations des régions où le rayonnement naturel est élevé ne manifestent au-

Tableau 48.5 • Estimation du risque vie entière de cancer attribuable à une irradiation aiguë de 0,1 Sv

Type ou site du cancer	Excès de décès par cancer pour 100 000 habitants	
	Nombre	Pourcentage*
Estomac	110	18
Poumon	85	3
Côlon	85	5
Leucémie (sauf leucémie lymphoïde chronique (LLC))	50	10
Vessie	30	5
Œsophage	30	10
Sein	20	1
Foie	15	8
Gonades	10	2
Thyroïde	8	8
Ostéosarcome	5	5
Peau	2	2
Autres	50	1
Total	500	2

\* Pourcentage d'augmentation par rapport au taux de mortalité «naturel» d'une population non irradiée.

Source: CIPR, 1991.

cune augmentation des taux de cancer que l'on puisse lui attribuer avec certitude (BEIR V, 1990; UNSCEAR, 1994). En fait, quelques études ont même suggéré l'existence d'une relation inverse entre le niveau du rayonnement naturel et les taux de cancer, relation que certains observateurs ont interprétée comme preuve des effets bénéfiques (ou des propriétés de l'effet ormesis) de l'irradiation de faible intensité par suite des réactions adaptatives de certains systèmes cellulaires (UNSCEAR, 1994). La relation inverse est cependant d'une validité douteuse, puisqu'elle n'a pas persisté lorsqu'on a tenu compte des effets des variables de confusion (BEIR V, 1990). De même, chez les travailleurs exposés aux rayonnements — sauf en ce qui concerne quelques cohortes de mineurs en roche dure travaillant sous terre (BEIR V, 1994; Lubin et coll., 1994) —, on ne signale pas aujourd'hui d'excédent de cancer, à part la leucémie (UNSCEAR, 1994), grâce aux mesures de radioprotection prises. De plus, les taux de leucémie chez ces travailleurs concordent avec les estimations présentées ci-dessus (CIRC, 1994). Bref, les données dont on dispose à l'heure actuelle sont compatibles avec ces estimations (voir tableau 48.5), selon lesquelles moins de 3% des cancers de l'ensemble de la population sont attribuables au rayonnement naturel (BEIR V, 1990; CIRC, 1994), quoiqu'un pourcentage pouvant atteindre 10% des cancers du poumon puisse être imputable au radon présent dans les locaux habités (BEIR V, 1990; Lubin et coll., 1994).

On a pu constater que les retombées hautement radioactives d'un essai nucléaire réalisé dans les îles de Bikini en 1954 ont causé une augmentation liée à la dose de la fréquence des cancers de la thyroïde chez des habitants des îles Marshall qui avaient subi une forte irradiation de la thyroïde lorsqu'ils étaient enfants (Robbins et Adams, 1989). De même, on a signalé que les enfants

des régions de la Biélorussie et de l'Ukraine contaminées par l'accident de Tchernobyl présentaient une incidence accrue de cancer de la thyroïde (Prisyazhiuk et coll., 1991; Kasakov, Demidchik et Astakhova, 1992). Ces résultats cependant divergent de ceux obtenus dans le cadre du Programme international sur les effets de l'accident de Tchernobyl sur la santé (International Programme on the Health Effects of the Chernobyl Accident (IPHECA)), selon lequel aucun excès de nodules thyroïdiens bénins ou malins n'était observé chez les enfants vivant dans les zones fortement contaminées situées aux alentours de Tchernobyl (Mettler et coll., 1992). La raison de cette divergence reste à élucider et l'hypothèse selon laquelle l'excédent de cancers signalé serait seulement imputable à une surveillance renforcée doit encore être examinée. Il y a lieu de noter, à cet égard, que chez les enfants du sud-ouest de l'Utah et du Nevada qui avaient été exposés aux retombées des essais nucléaires menés dans le Nevada dans les années cinquante, il y avait une fréquence accrue de tous les genres de cancers de la thyroïde (Kerber et coll., 1993) et que la prévalence de la leucémie aiguë semble avoir été élevée parmi les enfants de ces régions décédés entre 1952 et 1957, période de plus forte exposition aux retombées (Stevens et coll., 1990).

Certains auteurs ont également suggéré que les excès de leucémie observés parmi les enfants vivant au voisinage des centrales nucléaires au Royaume-Uni pourraient être dus aux rejets radioactifs émis par ces centrales. Pourtant, on a estimé que les rejets n'ont ajouté que moins de 2% à la dose totale de rayonnement à laquelle ces enfants ont été exposés, ce qui porte à croire que d'autres explications sont plus probables (Doll, Evans et Darby, 1994). Il est possible que les excès de leucémie observés aient fait l'objet d'une recherche étiologique insuffisante: c'est ce que suggère l'existence d'excès comparables de leucémie infantile à des endroits au Royaume-Uni qui n'ont aucune centrale nucléaire, mais qui ont récemment connu, comme les sites de telles centrales, d'importants accroissements démographiques (Kinlen, 1988; Doll, Evans et Darby, 1994). Une étude cas-témoins (Gardner et coll., 1990) a abouti à une autre hypothèse, celle que les leucémies en question puissent découler de l'exposition professionnelle des pères des enfants en cause. Toutefois, cette hypothèse est en général rejetée pour les raisons que nous examinons dans la section suivante.

### Les effets héréditaires

Quoique bien documentés pour d'autres organismes vivants, les effets héréditaires de l'irradiation n'ont jamais été observés chez les humains. Ainsi, une étude intensive de plus de 76 000 enfants de survivants japonais des bombardements atomiques, qui s'est étendue sur une quarantaine d'années, n'a révélé aucun effet héréditaire des rayonnements ionisants sur cette population, tels que grossesses à issue défavorable, décès chez les nouveau-nés, tumeurs malignes, translocations chromosomiques équilibrées, aneuploïdie des chromosomes sexuels, altérations des phénotypes de protéines sériques ou érythrocytaires, changements du sexe ratio ou troubles de la croissance et du développement (Neel et coll., 1990). Par conséquent, l'estimation des risques d'effets héréditaires des rayonnements dépend dans une grande mesure de l'extrapolation des conclusions tirées de l'observation de souris et d'autres animaux de laboratoire (BEIR V, 1990; UNSCEAR, 1993).

D'après les données expérimentales et épidémiologiques disponibles, on a déduit que la dose nécessaire pour doubler le taux de mutations héréditaires dans les cellules reproductrices humaines est d'au moins 1,0 Sv (BEIR V, 1990; UNSCEAR, 1993). On estime, sur cette base, que moins de 1% de l'ensemble des maladies humaines d'origine génétique sont attribuables au rayonnement naturel (voir tableau 48.6).

Tableau 48.6 • Estimations de la fréquence des effets héréditaires attribuables aux rayonnements ionisants naturels

Type de trouble	Prévalence naturelle (par million de naissances vivantes)	Contribution des sources naturelles de rayonnement <sup>1</sup> (par million de naissances vivantes) <sup>2</sup>	
		Première génération	Génération d'équilibre <sup>3</sup>
Autosomique dominant	180 000	20-100	300
Lié au sexe	400	<1	<15
Récessif	2 500	<1	Augmentation très lente
Chromosomique	4 400	<20	Augmentation très lente
Malformations congénitales	20 000-30 000	30	30-300
<b>Autres troubles à étiologie complexe</b>			
Cardiopathie	600 000	Non estimé <sup>4</sup>	Non estimé <sup>4</sup>
Cancer	300 000	Non estimé <sup>4</sup>	Non estimé <sup>4</sup>
Autres troubles définis	300 000	Non estimé <sup>4</sup>	Non estimé <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Equivalent de ≈1mSv par an, ou ≈30 mSv par génération (30 ans). <sup>2</sup> Valeurs arrondies. <sup>3</sup> Après des centaines de générations, l'addition de mutations radio-induites défavorables est, en définitive, compensée par leur perte dans la population, ce qui aboutit à une forme d'«équilibre» génétique. <sup>4</sup> On ne dispose pas d'estimations quantitatives des risques à cause de l'incertitude liée à la composante mutationnelle des maladies en cause.

Source: d'après Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations (BEIR V), 1990.

Comme nous l'avons mentionné plus haut, les résultats d'une étude cas-témoins (Gardner et coll., 1990) avaient permis d'avancer l'hypothèse selon laquelle le surcroît de fréquence des leucémies et des lymphomes non hodgkiniens chez les jeunes du village de Seascale résultait des effets oncogènes héréditaires de l'exposition professionnelle aux rayonnements des pères de ces enfants qui avaient travaillé à l'installation nucléaire de Sellafield. Toutefois, cette hypothèse s'est heurtée à de nombreux arguments contraires, notamment:

1. l'absence de tout excès comparable parmi les nombreux enfants nés ailleurs qu'à Seascale de pères ayant reçu à Sellafield des doses professionnelles semblables sinon supérieures (Wakeford et coll., 1994a);
2. l'absence d'excès semblables parmi les enfants français (Hill et Laplanche, 1990), canadiens (McLaughlin et coll., 1993) et écossais (Kinlen, Clarke et Balkwill, 1993) nés de pères ayant subi des expositions professionnelles comparables;
3. l'absence d'excès parmi les enfants de survivants des bombardements atomiques (Yoshimoto et coll., 1990);
4. l'absence d'excès dans les comtés des Etats-Unis où se trouvent des centrales nucléaires (Jablón, Hrubec et Boice, 1991);
5. le fait que la fréquence des mutations radio-induites qu'implique cette hypothèse est de loin plus élevée que les taux reconus (Wakeford et coll., 1994b).

On peut donc dire, dans l'ensemble, que les données disponibles ne confirment pas l'hypothèse de l'irradiation des gonades paternelles (Doll, Evans et Darby, 1994; Little, Charles et Wakeford, 1995).

### Les effets de l'irradiation prénatale

La radiosensibilité est assez élevée pendant toute la vie prénatale, mais les effets d'une dose donnée varient considérablement avec la phase de développement de l'embryon ou du fœtus au moment de l'exposition (UNSCEAR, 1986). C'est avant l'implantation que l'embryon court les plus grands risques d'être tué par l'irradiation, tandis qu'il est plus susceptible de subir des malformations et d'autres troubles du développement durant les phases critiques de l'organogenèse (voir tableau 48.7). Ce dernier fait est illustré par l'augmentation, liée à la dose, de la fréquence des déficiences mentales graves (voir figure 48.8) et par la baisse, également liée à la dose, des scores de quotient intellectuel des survivants des bombardements atomiques qui avaient été exposés entre huit et

quinze semaines (et, dans une moindre mesure, entre seize et vingt-cinq semaines) (UNSCEAR, 1986, 1993).

La sensibilité aux effets cancérogènes des rayonnements semble aussi assez élevée pendant toute la période prénatale, si l'on en juge d'après l'association entre les cancers infantiles (y compris la leucémie) et l'exposition prénatale aux rayons X utilisés à des fins diagnostiques dans des études cas-témoins (BEIR V, 1990). Les résultats de ces études impliquent que l'irradiation prénatale pourrait multiplier le risque de leucémie et d'autres cancers infantiles par un facteur de 40 par Sv (UNSCEAR, 1986; BEIR V, 1990), ce qui est bien plus important que l'accroissement imputable à l'exposition postnatale (UNSCEAR, 1986; BEIR V, 1990). Si, paradoxalement, on n'a noté aucun excès de cancer infantile chez les survivants des bombardements atomiques qui avaient été irradiés avant leur naissance (Yoshimoto et coll., 1990), le nombre de ces survivants était trop faible pour que l'on puisse exclure un tel effet.

Tableau 48.7 • Principales anomalies de croissance causées par l'irradiation in utero

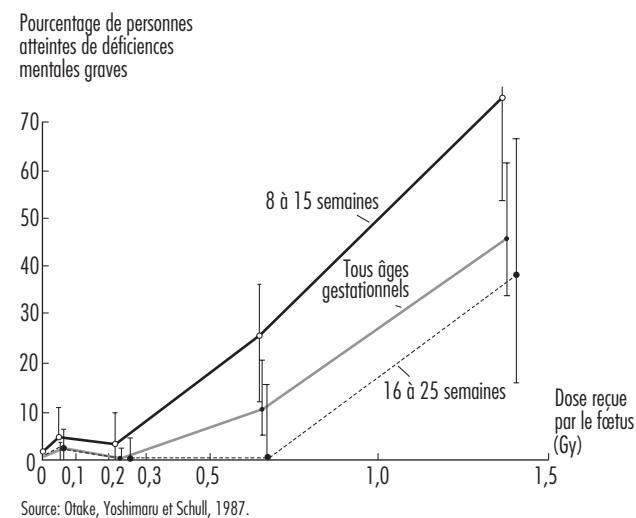
Cerveau		
Anencéphalie	Porencéphalie	Microcéphalie*
Encéphalocèle	Syndrome de Down*	Medulla réduite
Atrophie cérébrale	Retard mental*	Neuroblastome
Aqueduc étroit	Hydrocéphalie*	Dilatation des ventricules*
Anomalies de la moelle épinière*	Anomalies des nerfs crâniens	
Yeux		
Anophthalmie	Microphthalmie*	Microcornée*
Colobome*	Déformation de l'iris	Absence du cristallin
Absence de la rétine	Paupières ouvertes	Strabisme*
Nystagmus*	Rétinoblastome	Hypermétropie
Glaucome	Cataracte*	Cécité
Chorio-rétinite*	Albinisme partiel	Ankyloblépharon
Squelette		
Arrêt général de la croissance	Crâne de taille réduite	Malformations du crâne*
Défauts de l'ossification de la tête*	Crâne bombé	Tête étroite
Bulles crâniennes	Bec-de-lièvre*	Thorax en entonnoir
Luxation de la hanche	Spina bifida	Déformation du coccyx
Déformation des pieds	Pied bot*	Anomalies des doigts*
Valgus calcanéen	Odontogenèse imperfecta*	Exostose tibiale
Amélogenèse*	Nécrose sclérotomienne	
Autres		
Situs inversus	Hydronéphrose	Urétéro-hydronephrose
Hydrocèle	Absence d'un rein	Anomalies gonadiques*
Cardiopathies congénitales	Malformations de la face	Maladies de l'hypophyse
Malformations des oreilles	Troubles moteurs	Nécrose des dermatomes
Nécrose des myotomes	Anomalies de la pigmentation cutanée	

\* Ces anomalies ont été observées chez des humains exposés avant la naissance à d'importantes doses de rayonnement et ont, par conséquent, été provisoirement attribuées à l'irradiation. Source: Brill et Fergatson, 1964.

### Résumé et conclusions

Les effets nocifs des rayonnements ionisants sur la santé humaine varient considérablement; ils vont de lésions évoluant vers un décès rapide à des effets non immédiats tels que cancers, malformations congénitales et troubles héréditaires qui pourront apparaître des mois, des années, voire des décennies plus tard. La nature, la fréquence et la gravité de ces effets dépendent de la qualité du rayonnement en cause ainsi que de la dose et des conditions d'exposition. La plupart de ces effets apparaissent après une irradiation d'un niveau assez élevé et ne se manifestent donc que chez des victimes d'accidents, des malades ayant subi des traitements de radiothérapie et d'autres personnes fortement irradiées. Par contre, on considère que la fréquence des effets génotoxiques et cancérogènes des rayonnements ionisants augmente en proportion directe de la dose sans qu'il semble exister de seuil. Par conséquent, même si l'on ne peut pas totalement exclure la possibilité qu'un tel seuil existe, on part de l'hypothèse que la fréquence des effets croît avec la dose pour tous les niveaux d'exposition. Pour la plupart des effets des rayonnements, la sensibilité des cellules exposées varie en fonction directe de leur taux de prolifération et en fonction inverse de leur degré de différencia-

Figure 48.8 • Fréquence des déficiences mentales graves en fonction de la dose de rayonnement reçue chez les survivants des bombardements atomiques, irradiés avant la naissance



48. LES RAYONNEMENTS IONISANTS

tion, l'embryon et les enfants en cours de développement étant particulièrement vulnérables.

## ● LES SOURCES DE RAYONNEMENTS IONISANTS

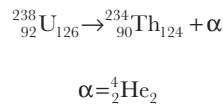
Robert N. Cherry, Jr.

### Les types de rayonnements ionisants

#### Les particules alpha

Une particule alpha est un ensemble étroitement lié formé de deux protons et de deux neutrons. Elle est identique à un noyau d'hélium 4 ( $^4\text{He}$ ). De fait, après avoir perdu la plus grande partie de son énergie cinétique, cette particule capturera en définitive deux électrons pour devenir un atome d'hélium.

Les radionucléides émetteurs alpha ont en général des noyaux relativement lourds. Presque tous ont un numéro atomique supérieur ou égal à celui du plomb ( $^{82}\text{Pb}$ ). Lorsqu'un noyau se désintègre en émettant une particule alpha, tant son numéro atomique (nombre de protons) que son nombre de neutrons baissent de deux unités, tandis que son nombre de masse diminue de quatre. Par exemple, la désintégration alpha de l'uranium 238 ( $^{238}\text{U}$ ), qui produit du thorium 234 ( $^{234}\text{Th}$ ), est représentée par la formule:



L'indice de gauche en haut est le nombre de masse atomique (nombre de protons + nombre de neutrons), l'indice de gauche en bas étant le numéro atomique (nombre de protons) et l'indice de droite, le nombre de neutrons.

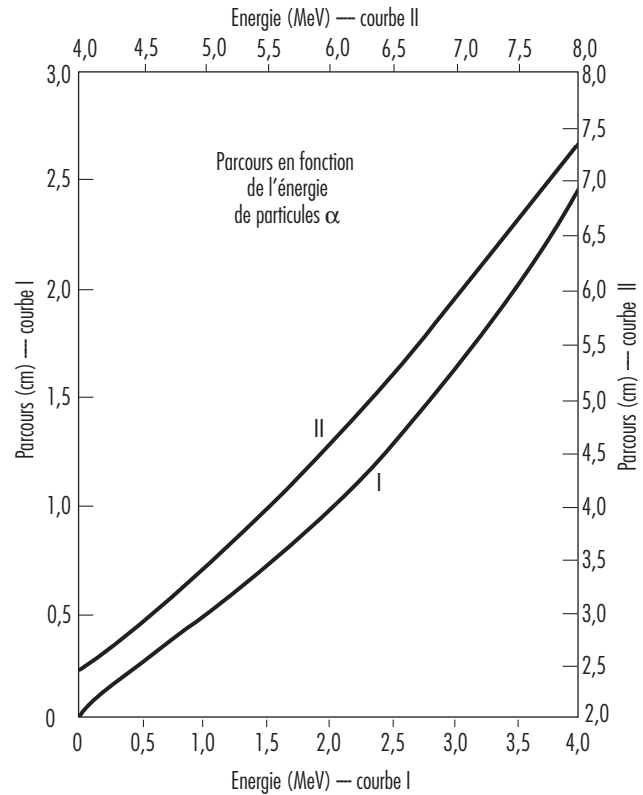
Les émetteurs alpha les plus courants émettent des particules dont l'énergie cinétique se situe entre 4 et 5,5 MeV et qui, dans l'air, ont un parcours ne dépassant pas 5 cm (voir figure 48.9). Pour pénétrer l'épiderme (couche protectrice de la peau, épaisse de 0,07 mm), une particule alpha doit posséder une énergie minimale de 7,5 MeV. Les émetteurs alpha ne présentent pas en général de risques par irradiation externe; ils ne constituent un danger que s'ils sont absorbés par l'organisme. Comme leur parcours est relativement court, leur transfert linéique d'énergie (TLE) est élevé, de même que leur facteur de pondération  $w_R$ , dont la valeur caractéristique est de 20.

#### Les particules bêta

Une particule bêta consiste en un électron ou un positon très énergétique (le positon est l'antiparticule de l'électron. Il a la même masse et la plupart des autres propriétés de l'électron, mais sa charge, exactement égale à celle de l'électron, est cependant de polarité opposée, c'est-à-dire positive). Les radionucléides émetteurs bêta peuvent avoir un numéro atomique faible ou élevé.

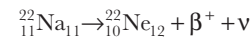
Les radionucléides ayant un excédent de protons par rapport à des nucléides stables ayant à peu près le même nombre de masse peuvent se désintégrer si un proton du noyau se transforme en neutron. Lorsque cela se produit, le noyau émet un positon ainsi qu'une particule extrêmement légère et à très faible interaction appelée neutrino (le neutrino et son antiparticule ne présentent pas d'intérêt dans le domaine de la radioprotection). Une fois qu'il a perdu la plus grande partie de son énergie cinétique, le positon finit par heurter un électron, provoquant l'annihilation des deux particules. Le rayonnement d'annihilation consiste presque tou-

Figure 48.9 • Parcours, en fonction de leur énergie, de particules alpha lentes se déplaçant dans l'air à 15 °C sous une pression de 760 mm Hg



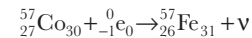
Source: Bethe, 1950.

jours en deux photons de 0,511 MeV émis dans des directions opposées à 180 degrés. La formule suivante illustre une désintégration caractéristique par émission de positons:



le positon étant représenté par  $\beta^+$  et le neutrino par  $\nu$ . Il convient de noter que le nucléide résultant a le même nombre de masse atomique que le nucléide père, un numéro atomique (nombre de protons) inférieur d'une unité et un nombre de neutrons supérieur d'une unité.

La capture d'électrons est un phénomène concurrent. Dans la désintégration par capture d'électrons, le noyau absorbe un électron orbital et émet un neutrino. La formule suivante illustre une désintégration caractéristique de ce genre:



La capture d'électrons est toujours possible quand le noyau résultant a une énergie totale inférieure à celle du noyau initial. Par contre, la désintégration par émission de positons ne peut se produire que si l'énergie totale de l'atome initial dépasse celle de l'atome résultant de plus de 1,02 MeV (deux fois l'énergie correspondant à la masse au repos du positon).

Comme les deux formes précédentes, la désintégration par émission de négaton ( $\beta^-$ ) se produit dans le cas de noyaux ayant un excédent de neutrons par rapport à des noyaux stables d'environ le même nombre de masse. Dans ce cas, le noyau émet un

négaton (électron énergétique) et un antineutrino. La formule suivante illustre une désintégration de ce genre:



le négaton étant représenté par  $\beta^{-}$  et l'antineutrino par  $\bar{\nu}$ . Dans ce cas, le noyau résultant acquiert un neutron en perdant un proton, une fois de plus sans changer de nombre de masse.

Comme la désintégration alpha est une réaction à deux particules, les particules alpha émises ont une énergie cinétique de valeur déterminée. Par contre, la radioactivité bêta faisant intervenir trois particules, l'énergie des particules bêta varie selon une distribution continue. L'énergie maximale de cette distribution dépend du radionucléide en cause, l'énergie bêta moyenne correspondant approximativement à un tiers de l'énergie maximale (voir figure 48.10).

Les énergies maximales bêta caractéristiques se situent entre 18,6 keV dans le cas du tritium ( ${}^3\text{H}$ ) et 1,71 MeV dans le cas du phosphore 32 ( ${}^{32}\text{P}$ ).

Dans l'air, les particules bêta ont un parcours d'environ 3,65 m par MeV d'énergie cinétique. Elles doivent avoir une énergie minimale de 70 keV pour pénétrer l'épiderme. Les particules bêta ont un faible TLE.

**Le rayonnement gamma**

Le rayonnement gamma est une onde électromagnétique émise par un noyau, siège d'une transition d'un niveau d'énergie supérieur à un niveau d'énergie inférieur. La transition ne modifie pas le nombre de protons et de neutrons du noyau. Ce dernier peut se retrouver à un niveau d'énergie supérieur par suite d'une désintégration alpha ou bêta antérieure. Autrement dit, les rayons gamma sont souvent émis immédiatement après des désintégrations alpha ou bêta. Le rayonnement gamma peut également résulter de la capture de neutrons ou de la diffusion inélastique de particules subatomiques par un noyau. C'est dans le rayonnement cosmique que l'on a pu déceler les rayons gamma les plus énergétiques.

La figure 48.11 présente le schéma de désintégration du cobalt 60 ( ${}^{60}\text{Co}$ ). La figure montre une cascade de rayons gamma émis dans le nickel 60 ( ${}^{60}\text{Ni}$ ) avec une énergie de 1,17 et 1,33 MeV, après la désintégration bêta du  ${}^{60}\text{Co}$ .

La figure 48.12 présente le schéma de désintégration du molybdène 99 ( ${}^{99}\text{Mo}$ ). Il y a lieu de noter que le technétium 99 ( ${}^{99}\text{Tc}$ ) résultant passe par un état excité d'une durée exceptionnellement longue ( $t_{1/2} = 6 \text{ h}$ ). Un noyau excité de ce genre est appelé *isomère*. La plupart des états nucléaires excités ont une période radioactive comprise entre quelques picosecondes (ps) et 1 microseconde ( $\mu\text{s}$ ).

La figure 48.13 présente le schéma de désintégration de l'arsenic 74 ( ${}^{74}\text{As}$ ). Elle montre que certains radionucléides se désintègrent de plusieurs façons.

Figure 48.10 • Distribution énergétique des électrons négatifs émis par le phosphore 32

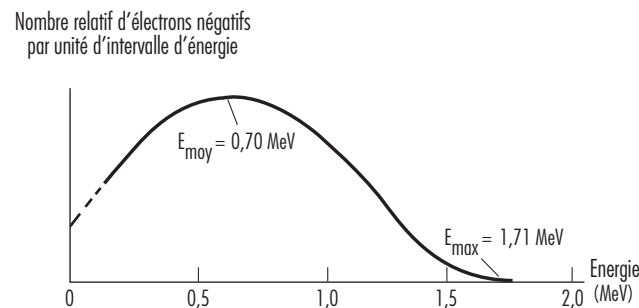
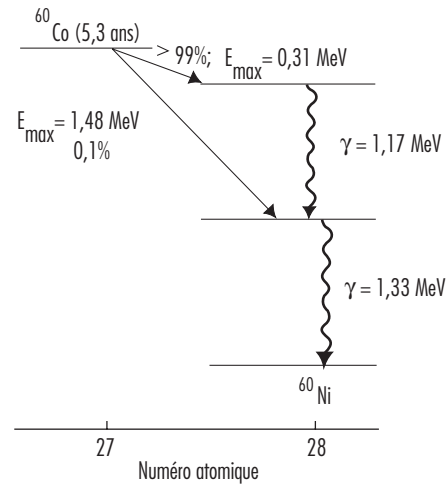


Figure 48.11 • Schéma de désintégration radioactive du cobalt 60

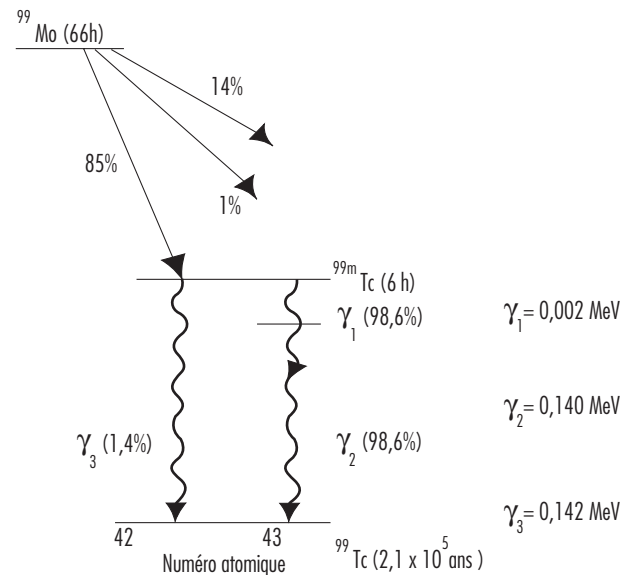


Tandis que les particules alpha et bêta ont un parcours défini dans la matière, le rayonnement gamma subit une atténuation exponentielle en traversant la matière (compte non tenu de l'accumulation due à la diffusion). Si on peut négliger cette dernière, l'atténuation du rayonnement gamma est donnée par la formule:

$$I(x) = I(0) \cdot e^{-\mu x}$$

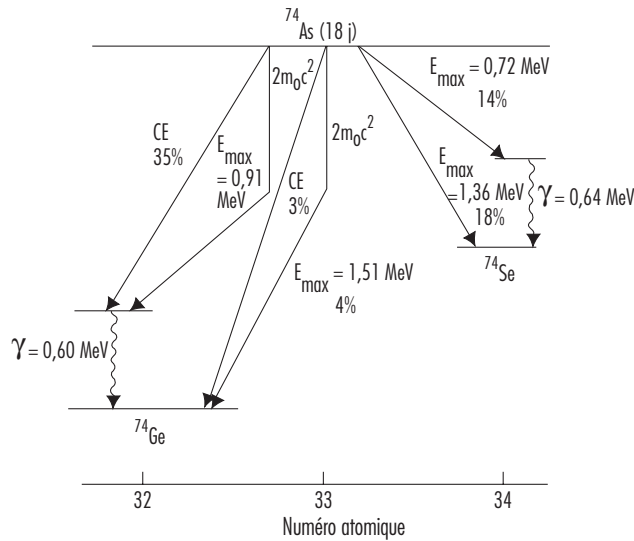
$I(x)$  étant l'intensité du rayonnement gamma en fonction de la distance  $x$  franchie dans la matière et  $\mu$  le coefficient d'atténuation massique. Ce coefficient dépend de l'énergie du rayonnement gamma et de la matière avec laquelle il interagit. Des valeurs caractéristiques de ces coefficients figurent dans beaucoup de ou-

Figure 48.12 • Schéma de désintégration radioactive du molybdène 99



48. LES RAYONNEMENTS IONISANTS

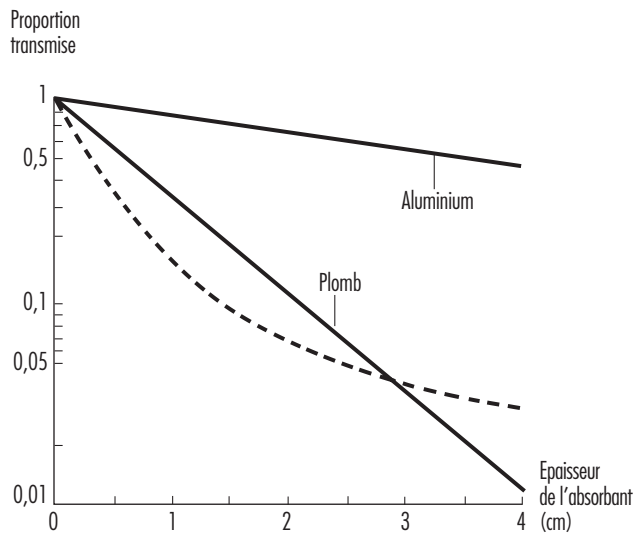
Figure 48.13 • Schéma de désintégration radioactive de l'arsenic 74, illustrant les processus concurrents d'émission d'électrons négatifs, d'émission de positons et de capture d'électrons ( $m_0$  est la masse au repos de l'électron)



vrages cités dans les références bibliographiques. La figure 48.14 montre l'absorption du rayonnement gamma dans la matière dans de bonnes conditions de géométrie (permettant de négliger l'accumulation).

L'accumulation se produit lorsqu'un large faisceau de rayons gamma interagit avec la matière. L'intensité du rayonnement

Figure 48.14 • Atténuation de rayons gamma de 667 keV dans l'aluminium et le plomb dans de bonnes conditions géométriques (la ligne pointillée représente l'atténuation d'un faisceau de photons polychromatique)



mesurée à certains points est supérieure à la valeur attendue d'une «bonne géométrie» (faisceau étroit) parce que des rayons diffusés des côtés du faisceau direct atteignent l'appareil de mesure. Le degré d'accumulation dépend de la géométrie du faisceau, de la matière traversée et de l'énergie des rayons gamma.

La conversion interne entre en concurrence avec l'émission gamma lorsqu'un noyau passe d'un certain niveau d'énergie à un niveau plus bas. En cas de conversion interne, l'émission par le noyau d'un rayonnement gamma est remplacée par l'éjection d'un électron des orbites internes. Cet électron est directement ionisant. Tandis que les électrons des orbites externes passent à des niveaux d'énergie inférieurs pour remplir le vide laissé par l'électron éjecté, l'atome émet des rayons X. La probabilité de la conversion interne par rapport à celle de l'émission d'un rayonnement gamma augmente avec le numéro atomique.

**Les rayons X**

Les rayons X sont des ondes électromagnétiques. A ce titre, ils ressemblent aux rayons gamma, la différence entre les deux résidant dans l'origine du rayonnement. Les rayons gamma partent du noyau de l'atome, tandis que les rayons X résultent de l'interaction des électrons. Même si les rayons X possèdent souvent moins d'énergie que les rayons gamma, ce critère ne permet pas vraiment de les différencier. Il est en effet possible de produire des rayons X d'énergie bien plus élevée que les rayons gamma qui résultent d'une désintégration radioactive.

La conversion interne, abordée plus haut, est l'un des moyens de produire des rayons X. Dans ce cas, ces rayons ont une énergie de valeur déterminée correspondant à la différence entre les niveaux d'énergie entre lesquels passent les électrons orbitaux.

Les particules chargées émettent un rayonnement électromagnétique chaque fois qu'elles sont accélérées ou décélérées, l'intensité du rayonnement émis étant inversement proportionnelle à la quatrième puissance de la masse de la particule. Par conséquent, toutes choses égales, les électrons émettent beaucoup plus de rayons X que les particules plus lourdes, comme les protons. On produit donc les rayons X en accélérant des électrons au moyen d'une différence de potentiel électrique de plusieurs milliers ou même millions de volts. Les électrons sont ensuite rapidement décélérés dans un matériau dense pouvant résister à des températures élevées, comme le tungstène (W).

L'énergie des rayons X émis par un tel système forme un spectre continu allant d'environ zéro à l'énergie cinétique maximale que possèdent les électrons avant leur décélération. Souvent, des rayons X à niveaux d'énergie discrets se superposent à ce spectre. Ils sont produits lorsque les électrons incidents ionisent la cible. Tandis que d'autres électrons orbitaux vont remplir les vides laissés par l'ionisation, ils émettent des rayons X à des niveaux discrets d'énergie, de la même façon que dans le processus de conversion interne. Ces rayons X sont dits *caractéristiques* parce qu'ils définissent de façon unique la matière de la cible (anode ou anticathode). La figure 48.15 présente un spectre caractéristique de rayons X et la figure 48.16 le schéma d'un tube à rayons X.

Les rayons X agissent sur la matière de la même façon que les rayons gamma, sauf qu'une simple équation exponentielle ne suffit pas pour décrire correctement l'atténuation de rayons X ayant un spectre d'énergie continu (voir figure 48.14). Toutefois, comme les rayons X de faible énergie s'affaiblissent plus rapidement que les rayons de haute énergie, tandis que le faisceau traverse la matière, l'atténuation après un certain parcours se rapproche d'une fonction exponentielle.

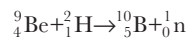
**Les neutrons**

En général, l'émission de neutrons n'est pas le résultat direct d'une désintégration radioactive naturelle. Les neutrons sont plutôt le produit de réactions nucléaires. Les réacteurs nucléaires

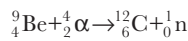
produisent beaucoup de neutrons, mais on en obtient également dans les accélérateurs de particules et en utilisant des sources spéciales de neutrons appelées sources ( $\alpha$ , n).

Les réacteurs nucléaires produisent des neutrons par fission des noyaux d'uranium (U) du combustible. En fait, la production des neutrons est essentielle au maintien de la réaction de fission.

Les accélérateurs de particules produisent des neutrons en accélérant des particules chargées, comme des protons ou des électrons, puis en les utilisant, une fois qu'elles ont acquis une haute énergie, pour bombarder les noyaux stables d'une cible. Les neutrons ne sont que l'un des types de particules résultant de telles réactions nucléaires. Ainsi, en accélérant des ions de deutérium pour bombarder une cible de béryllium dans un cyclotron, on obtient des neutrons selon la réaction suivante:



Des émetteurs alpha mélangés à du béryllium peuvent être employés comme sources portables de neutrons, ou sources ( $\alpha$ , n), qui agissent selon la réaction:



On peut utiliser, comme sources de particules alpha, des isotopes tels que le polonium 210 ( ${}^{210}\text{Po}$ ), le plutonium 239 ( ${}^{239}\text{Pu}$ ) et l'américium 241 ( ${}^{241}\text{Am}$ ).

Les neutrons sont en général classés selon leur énergie, comme le montre le tableau 48.8. Ce classement en quelque sorte arbitraire peut varier avec la situation considérée.

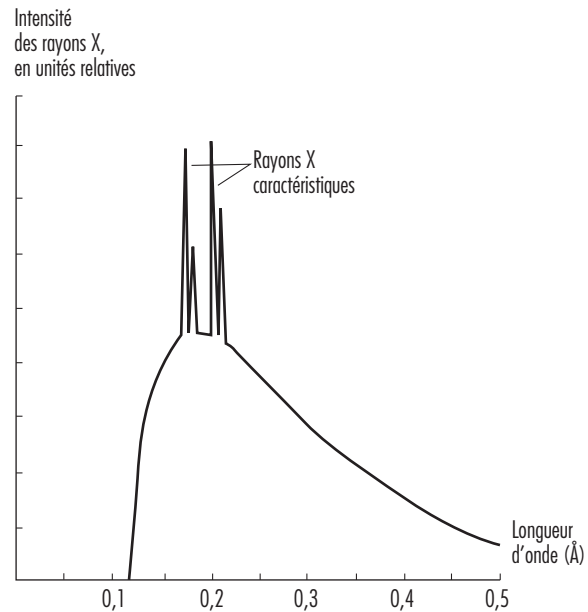
Il existe plusieurs modes d'interaction des neutrons avec la matière, mais les deux principaux qui nous intéressent, à des fins de radioprotection, sont la diffusion élastique et la capture de neutrons.

La diffusion élastique ramène les neutrons à haute énergie à leur niveau thermique. Interagissant principalement par diffusion élastique, ces neutrons ne causent généralement ni fission ni radioactivité par capture neutronique. Ces interactions sont plutôt produites par les neutrons dits thermiques.

La diffusion élastique résulte de l'interaction d'un neutron avec un noyau, le premier étant dévié de sa trajectoire après avoir cédé une partie de son énergie cinétique au second. Ainsi excité, le noyau libère peu après cette énergie sous forme d'un rayonnement gamma.

Lorsque le neutron atteint finalement son niveau d'énergie thermique (ainsi appelé parce que le neutron se trouve alors en équilibre thermique avec son environnement), il est facilement capturé par la plupart des noyaux. Étant électriquement neutre, le neutron n'est pas repoussé par un noyau positif, comme le serait un proton. Lorsqu'un neutron thermique s'approche assez d'un noyau pour subir l'interaction forte, c'est-à-dire à quelques femtomètres (1 fm =  $10^{-15}$  mètre), il est capturé par le noyau. Il en résulte un noyau radioactif qui émet un photon ou une autre particule ou, dans le cas d'un noyau fissile comme l'uranium  ${}^{235}\text{U}$

Figure 48.15 • Spectre de rayons X illustrant l'émission de rayons X caractéristiques lorsque les électrons comblent les vides de la couche K de la cible en tungstène (la longueur d'onde des rayons X est inversement proportionnelle à leur énergie)



ou le plutonium  ${}^{239}\text{Pu}$ , se subdivise en deux noyaux plus petits en libérant plus de neutrons.

Conformément aux lois de la cinématique, les neutrons atteignent plus rapidement leur niveau d'énergie thermique si le milieu de diffusion élastique comprend un grand nombre de noyaux légers. Un neutron qui rebondit sur un noyau léger cède une bien plus grande part de son énergie cinétique que s'il rebondissait sur un noyau lourd. C'est pour cette raison que l'eau et les autres substances hydrogénées sont les plus efficaces pour ralentir les neutrons.

Un faisceau monoénergétique de neutrons subit une atténuation exponentielle en traversant la matière, selon une équation semblable à celle que nous avons donnée plus haut pour les

Figure 48.16 • Schéma simplifié d'un tube à rayons X à anode fixe et filament chauffé

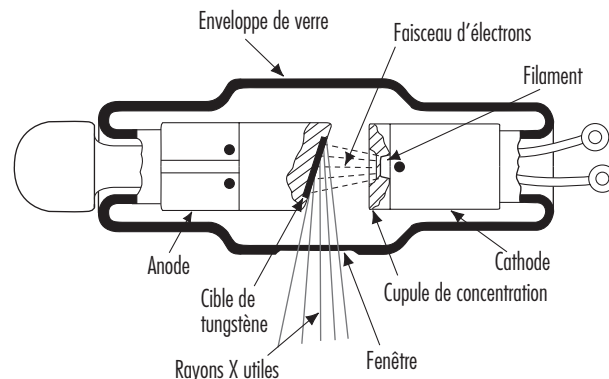


Tableau 48.8 • Classification des neutrons selon l'énergie cinétique

Type	Plage d'énergie
Lent ou thermique	0-0,1 keV
Intermédiaire	0,1-20 keV
Rapide	20 keV-10 MeV
Haute énergie	>10 MeV

photons. La probabilité d'interaction entre un neutron et un noyau donné est exprimée par une grandeur appelée *section efficace*. La section efficace se mesure en unités de surface, l'unité spéciale adoptée en radioprotection étant le *barn* (b), ainsi défini:

$$1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$$

Il est extrêmement difficile de produire des neutrons sans qu'ils soient accompagnés de rayons X et gamma. On peut en fait supposer, d'une manière générale, que la présence de neutrons implique la présence de photons à haute énergie.

### Les sources de rayonnements ionisants

#### Les radionucléides naturels

Les radionucléides naturels sont présents dans la nature parce que leur période radioactive est comparable à l'âge de la Terre. Le tableau 48.9 énumère les plus importants.

Les isotopes de l'uranium et du thorium figurent en tête d'une longue chaîne de descendants radioactifs qui, de ce fait, sont également présents dans la nature. Les parties A à C de la figure 48.17 présentent les schémas de désintégration du thorium <sup>232</sup>Th, de l'uranium <sup>238</sup>U et de l'uranium <sup>235</sup>U. Comme la désintégration alpha est courante aux numéros atomiques supérieurs à 205 et que le nombre de masse d'une particule alpha est de 4, il existe quatre chaînes distinctes de désintégration pour les noyaux lourds. L'une d'elles (partie D de la figure 48.17), celle du neptunium 237 (<sup>237</sup>Np), n'existe pas dans la nature parce qu'elle ne comporte aucun radionucléide «naturel», c'est-à-dire dont la période radioactive est comparable à l'âge de la Terre.

Il y a lieu de noter que les isotopes du radon sont présents dans les quatre chaînes (<sup>219</sup>Rn, <sup>220</sup>Rn et <sup>222</sup>Rn). Comme le radon est un gaz, il a la possibilité, une fois produit, de se libérer de la matrice dans laquelle il s'est formé pour rejoindre l'atmosphère. Cependant, la période du radon 219 est beaucoup trop courte pour que des quantités importantes puissent s'accumuler dans des endroits habités. De même, la période relativement courte du radon 220 fait que l'on s'en préoccupe moins que du radon 222 comme risque pour la santé.

Outre le radon, les radionucléides naturels externes soumettent l'être humain en moyenne à une dose efficace annuelle de rayonnement de 0,3 mSv. La dose efficace réelle varie considérablement, étant surtout déterminée par la teneur du sol local en uranium et en thorium. Dans les régions du monde où on trouve du sable monazite, la dose efficace annuelle reçue par chaque individu peut atteindre près de 20 mSv. A d'autres endroits, comme les atolls coralliens et les bords de mer, elle peut être d'à peine 0,03 mSv (voir figure 48.17).

Considéré généralement à part des autres radionucléides naturels, le radon se dégage lentement du sol pour atteindre l'atmosphère. Une fois dans l'air, il se désintègre pour former des radio-isotopes de polonium (Po), de bismuth (Bi) et de plomb (Pb). Ces descendants se fixent sur des particules de poussière qui

peuvent alors être inspirées et rester dans les poumons. On estime en moyenne à environ 20 mSv l'équivalent de dose annuel absorbé par les poumons, ce qui est comparable à une dose efficace d'environ 2 mSv reçue par le corps entier. De toute évidence, le radon et ses descendants radioactifs constituent la composante la plus importante du rayonnement naturel auquel nous sommes soumis (voir figure 48.17).

#### Le rayonnement cosmique

Les rayons cosmiques comprennent des particules énergétiques d'origine extraterrestre qui viennent bombarder l'atmosphère (le rayonnement étant essentiellement particulaire et surtout formé de protons). Ils comportent également des particules secondaires — principalement des photons, des neutrons et des muons — engendrées par l'interaction des particules primaires avec les gaz atmosphériques.

A cause de ces interactions, l'atmosphère joue le rôle d'un écran protecteur contre le rayonnement cosmique: plus l'écran est mince, plus la dose efficace est grande. Par conséquent, le débit de dose efficace dû à ce rayonnement augmente avec l'altitude. Ainsi, le débit à 1 800 m d'altitude est le double de celui qui existe au niveau de la mer.

Comme le rayonnement cosmique primaire consiste surtout en particules chargées, il est influencé par le champ magnétique terrestre. Cela revient à dire que les habitants des hautes latitudes reçoivent des doses efficaces plus importantes que les populations vivant près de l'équateur. Les variations dues à cet effet sont de l'ordre de 10%.

Enfin, le débit de dose efficace dû au rayonnement cosmique varie avec les fluctuations de l'activité solaire. En moyenne, la contribution des rayons cosmiques au rayonnement naturel est d'environ 0,3 mSv de dose efficace au corps entier.

#### Les radionucléides d'origine cosmique

Le rayonnement cosmique engendre des radionucléides dans l'atmosphère, par interaction avec les gaz atmosphériques. Les plus importants sont le tritium (<sup>3</sup>H), le béryllium (<sup>7</sup>Be), le carbone (<sup>14</sup>C) et le sodium (<sup>22</sup>Na). Ces radionucléides sont responsables d'une dose efficace annuelle d'environ 0,01 mSv, dont la plus grande partie est due au <sup>14</sup>C.

#### Les retombées radioactives

De nombreux essais d'armes nucléaires ont été réalisés dans l'atmosphère entre les années quarante et les années soixante, produisant d'importantes quantités de substances radioactives qui se sont dispersées dans l'environnement, partout dans le monde, sous forme de *retombées*. Même si la plupart de ces substances se sont désintégrées depuis, engendrant des isotopes stables, les petites quantités qui restent continueront à agir comme sources d'irradiation pendant très longtemps encore. De plus, les pays qui procèdent encore à l'occasion à des essais nucléaires dans l'atmosphère augmentent ces quantités.

Les principaux constituants des retombées qui contribuent à la dose efficace comprennent actuellement le strontium 90 (<sup>90</sup>Sr) et le césium 137 (<sup>137</sup>Cs), qui ont tous deux une période radioactive d'environ trente ans. La dose efficace annuelle moyenne due aux retombées s'élève à environ 0,05 mSv.

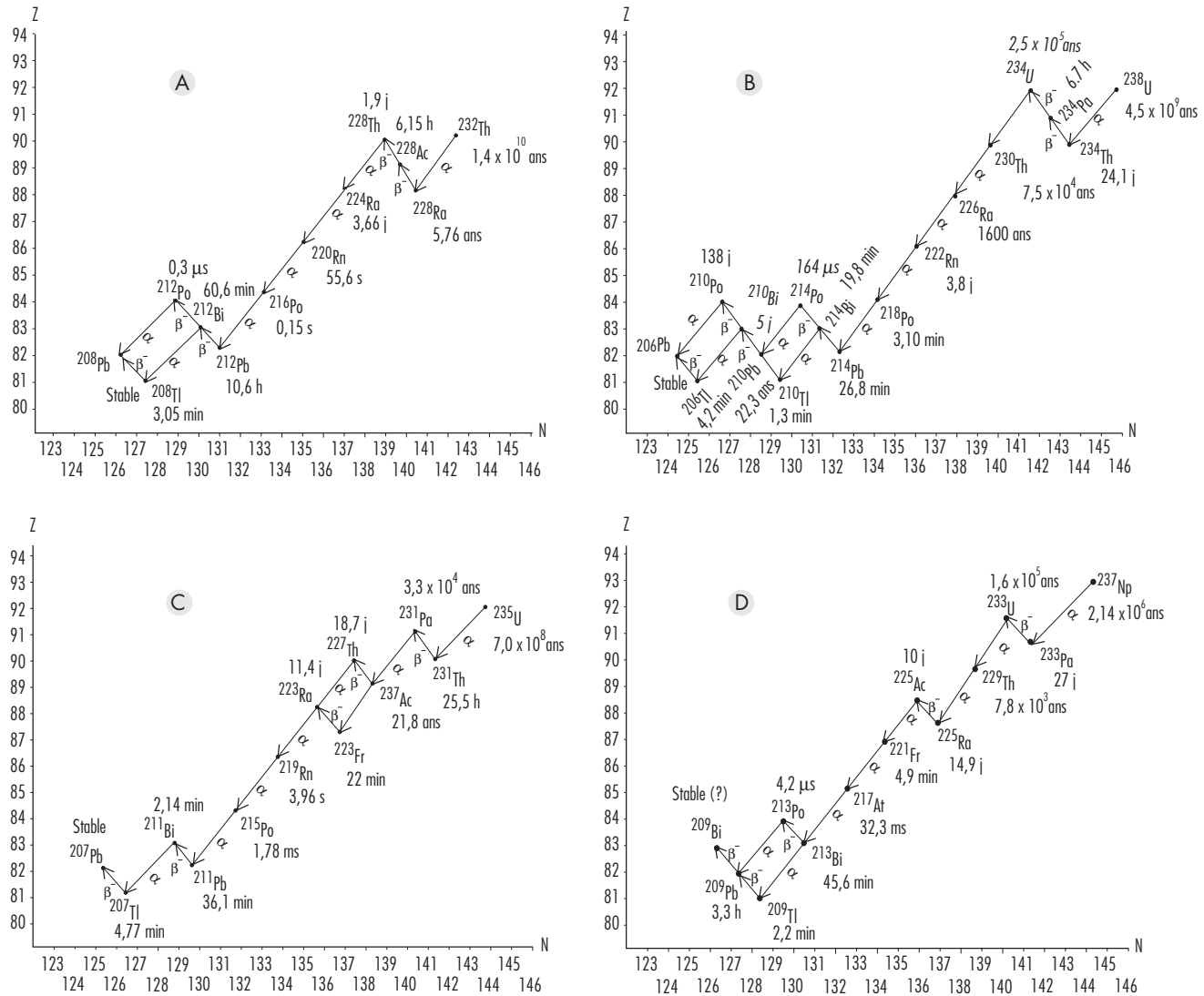
#### Les radioéléments incorporés

Le dépôt de radionucléides naturels dans l'organisme résulte principalement de leur inhalation dans l'air et de leur ingestion dans les aliments et l'eau. Ils comprennent les radio-isotopes du plomb (Pb), du polonium (Po), du bismuth (Bi), du radium (Ra), du potassium (K), du carbone (C), de l'hydrogène (H), de l'uranium (U) et du thorium (Th). Parmi ces éléments, le potassium <sup>40</sup>K est le plus important contributeur à la dose. Les radionucléides natu-

Tableau 48.9 • Radionucléides naturels

Radio-isotope	Période (10 <sup>9</sup> ans)	Teneur isotopique (%)
<sup>238</sup> U	4,47	99,3
<sup>232</sup> Th	14,0	100
<sup>235</sup> U	0,704	0,720
<sup>40</sup> K	1,25	0,0117
<sup>87</sup> Rb	48,9	27,9

Figure 48.17 • Familles radioactives (Z = numéro atomique; N = nombre de masse)



A: Famille radioactive du thorium 232; B: Famille radioactive de l'uranium 238; C: Famille radioactive de l'uranium 235; D: Famille radioactive du neptunium 237.

rels déposés dans l'organisme ont une contribution d'environ 0,3 mSv à la dose efficace annuelle.

**Le rayonnement artificiel**

L'utilisation médicale des rayons X constitue la source d'exposition la plus importante aux rayonnements artificiels. Des millions de tubes à rayons X sont en service dans le monde. L'exposition moyenne provenant de cette source dépend dans une grande mesure de l'accès de la population aux soins médicaux. Dans les pays développés, la dose efficace annuelle provenant de l'utilisation médicale des rayons X et de substances radioactives à des fins diagnostiques et thérapeutiques est en moyenne de l'ordre de 1 mSv.

Par ailleurs, les rayons X sont un sous-produit de la plupart des accélérateurs de particules à haute énergie utilisés par les physiciens, et surtout de ceux qui servent à accélérer des électrons et des

positons. Toutefois, les blindages, les précautions prises et l'effectif limité de la population exposée font que cette source d'exposition est sensiblement moins importante que les précédentes.

**Les radionucléides artificiels**

Les réactions nucléaires qui se produisent dans les accélérateurs de particules donnent naissance à un grand nombre de radionucléides en quantités diverses. Les particules accélérées comprennent des protons, des deutons (noyaux de <sup>2</sup>H), des particules alpha, des mésons chargés, des ions lourds, etc. Les cibles peuvent être faites de quasiment tout isotope.

Les accélérateurs de particules sont en pratique la seule source de radio-isotopes émetteurs de positons (les réacteurs nucléaires tendent à produire des radio-isotopes riches en neutrons qui se désintègrent en émettant des électrons négatifs). On s'en sert également de plus en plus pour obtenir des isotopes de courte

48. LES RAYONNEMENTS IONISANTS

Tableau 48.10 • Estimations des doses efficaces individuelles liées à des matériaux et à des produits de consommation technologiquement évolués

Groupe I — Produits de grande consommation avec de très fortes doses efficaces individuelles	
Produits du tabac	Carburants
Réseaux publics de distribution d'eau	Verre et céramique
Matériaux de construction	Verres correcteurs
Produits miniers et agricoles	
Groupe II — Produits touchant un grand nombre de personnes, avec des doses efficaces relativement petites ou n'affectant qu'une petite partie du corps	
Téléviseurs	Matériaux de construction de routes et de voies publiques
Produits radioluminescents	Transport de matières radioactives par avion
Systèmes d'inspection aéroportuaires	Irradiateurs à éclateurs et tubes électroniques
Détecteurs de gaz et d'aérosols (fumée)	Produits du thorium: démarreurs de tubes fluorescents et manchons incandescents
Groupe III — Produits ne touchant qu'un petit nombre de personnes, avec de faibles doses efficaces collectives	
Produits du thorium: électrodes de soudage en tungstène	

Source: National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP), 1987.

période utilisés à des fins médicales, notamment en tomographie par émission de positons.

**Les matériaux et produits de consommation technologiquement évolués**

Des rayons X et matières radioactives sont produits par de très nombreuses opérations techniques modernes, de façon délibérée ou non. Le tableau 48.10 énumère quelques-unes des sources de rayonnement les plus courantes.

● **LA RADIOPROTECTION ET LA CONCEPTION DES LIEUX DE TRAVAIL**

*Gordon M. Lodde*

**Caractéristiques techniques de base des installations radiologiques**

Les dangers associés à la manipulation et à l'utilisation de sources de rayonnement imposent d'adopter des caractéristiques spéciales de conception et de construction qui ne sont pas nécessaires dans les laboratoires et les lieux de travaux classiques. Ces caractéristiques sont incorporées dans l'installation de façon à éviter une gêne excessive aux travailleurs sans toutefois les exposer à des risques indus de rayonnement externe ou interne.

Il est nécessaire à cet effet de contrôler l'accès de toutes les zones où pourraient se trouver des sources de rayonnement ou

des matières radioactives, non seulement en désignant les travailleurs autorisés à y entrer, mais aussi en précisant les types de vêtements ou d'équipements de protection à porter et les précautions à observer quand ils s'y trouvent. Il est utile, pour l'administration de telles mesures de contrôle, de classer les lieux de travail selon la présence de rayonnements ionisants, d'une contamination radioactive ou des deux. L'introduction de tels concepts de classification des lieux de travail aux premiers stades de planification permet de doter l'installation de toutes les caractéristiques nécessaires pour réduire le danger des opérations effectuées sur des sources de rayonnement.

**La classification des zones de travail et des types de laboratoires**

Pour classer les lieux de travail, il est utile de commencer par grouper les radionucléides selon leur radiotoxicité relative par unité d'activité. Le groupe I comprend les éléments à très haute toxicité, le groupe II les éléments à haute toxicité, le groupe III les éléments à toxicité modérée et le groupe IV les éléments à faible toxicité. Le tableau 48.11 présente une classification de nombreux radionucléides selon leur groupe de radiotoxicité.

On peut définir trois types principaux de laboratoires en se basant sur les considérations de radiotoxicité, les quantités de matières radioactives devant être manipulées dans les lieux de travail et le genre d'opérations en cause.

Le tableau 48.12 présente une description des différents types de laboratoires et donne des exemples de chacun. Le tableau 48.13 montre les types de laboratoires ainsi que la classification des lieux de travail et les mesures correspondantes de contrôle de l'accès (AIEA, 1973).

Le danger qu'il y a à travailler sur des matières radioactives dépend non seulement du niveau de radiotoxicité, de toxicité chimique et d'activité des radionucléides, mais aussi des caractéristiques physiques et chimiques des matières ainsi que de la nature et de la complexité de l'opération ou du processus à exécuter.

**L'emplacement d'une installation radiologique dans un bâtiment**

Lorsqu'une installation radiologique doit faire partie d'un grand bâtiment, il importe de tenir compte des principes ci-après au moment de son implantation.

- L'installation radiologique devrait se trouver dans une zone relativement peu fréquentée du bâtiment, afin de faciliter le contrôle de l'accès.
- Le risque d'incendie dans la zone choisie devrait être minimal.
- L'emplacement ainsi que les moyens de chauffage et de ventilation devraient être choisis de façon à minimiser les possibilités de propagation de la contamination radioactive tant en surface qu'en suspension dans l'air.
- Il faudrait choisir judicieusement l'emplacement afin de parvenir, sans dépenses excessives en matière d'écrans, à maintenir les niveaux de rayonnement dans les limites prescrites au voisinage immédiat de l'installation.

**La planification des installations radiologiques**

Si l'on envisage une gradation des niveaux d'activité, le laboratoire devrait être aménagé de façon que l'accès aux zones à haut rayonnement ou à forte contamination radioactive soit graduel; on entrerait d'abord dans une zone sans rayonnement, puis on passerait successivement dans les zones à faible activité, à activité moyenne et ainsi de suite.

On peut éviter les systèmes de ventilation complexes dans les petits laboratoires en recourant à des hottes et à des boîtes à gants

Tableau 48.11 • Classification des radionucléides selon la radiotoxicité relative par unité d'activité

Groupe I: très haute toxicité									
<sup>210</sup> Pb	<sup>210</sup> Po	<sup>223</sup> Ra	<sup>226</sup> Ra	<sup>228</sup> Ra	<sup>227</sup> Ac	<sup>227</sup> Th	<sup>228</sup> Th	<sup>230</sup> Th	<sup>231</sup> Pa
<sup>230</sup> U	<sup>232</sup> U	<sup>233</sup> U	<sup>234</sup> U	<sup>237</sup> Np	<sup>238</sup> Pu	<sup>239</sup> Pu	<sup>240</sup> Pu	<sup>241</sup> Pu	<sup>242</sup> Pu
<sup>241</sup> Am	<sup>243</sup> Am	<sup>242</sup> Cm	<sup>243</sup> Cm	<sup>244</sup> Cm	<sup>245</sup> Cm	<sup>246</sup> Cm	<sup>249</sup> Cm	<sup>250</sup> Cf	<sup>252</sup> Cf
Groupe II: haute toxicité									
<sup>22</sup> Na	<sup>36</sup> Cl	<sup>45</sup> Ca	<sup>46</sup> Sc	<sup>54</sup> Mn	<sup>56</sup> Co	<sup>60</sup> Co	<sup>89</sup> Sr	<sup>90</sup> Sr	<sup>91</sup> Y
<sup>95</sup> Zr	<sup>106</sup> Ru	<sup>110</sup> Ag <sup>m</sup>	<sup>115</sup> Cd <sup>m</sup>	<sup>114</sup> In <sup>m</sup>	<sup>124</sup> Sb	<sup>125</sup> Sb	<sup>127</sup> Te <sup>m</sup>	<sup>129</sup> Te <sup>m</sup>	<sup>124</sup> I
<sup>126</sup> I	<sup>131</sup> I	<sup>133</sup> I	<sup>134</sup> Cs	<sup>137</sup> Cs	<sup>140</sup> Ba	<sup>144</sup> Ce	<sup>152</sup> Eu (13 ans)	<sup>154</sup> Eu	<sup>160</sup> Tb
<sup>170</sup> Tm	<sup>181</sup> Hf	<sup>210</sup> Bi	<sup>182</sup> Ta	<sup>192</sup> Ir	<sup>204</sup> Tl	<sup>207</sup> Bi	<sup>230</sup> Pa	<sup>211</sup> At	<sup>212</sup> Pb
<sup>224</sup> Ra	<sup>228</sup> Ac	<sup>234</sup> Th	<sup>236</sup> U	<sup>249</sup> Bk					
Groupe III: toxicité modérée									
<sup>7</sup> Be	<sup>14</sup> C	<sup>18</sup> F	<sup>24</sup> Na	<sup>38</sup> Cl	<sup>31</sup> Si	<sup>32</sup> P	<sup>35</sup> S	<sup>41</sup> A	<sup>42</sup> K
<sup>43</sup> K	<sup>47</sup> Sc	<sup>48</sup> Sc	<sup>48</sup> V	<sup>51</sup> Cr	<sup>52</sup> Mn	<sup>56</sup> Mn	<sup>52</sup> Fe	<sup>55</sup> Fe	<sup>59</sup> Fe
<sup>57</sup> Co	<sup>53</sup> Ni	<sup>65</sup> Ni	<sup>64</sup> Cu	<sup>65</sup> Zn	<sup>69</sup> Zn <sup>m</sup>	<sup>72</sup> Ga	<sup>73</sup> As	<sup>74</sup> As	<sup>76</sup> As
<sup>77</sup> As	<sup>82</sup> Br	<sup>85</sup> Kr <sup>m</sup>	<sup>87</sup> Kr	<sup>86</sup> Rb	<sup>85</sup> Sr	<sup>91</sup> Sr	<sup>90</sup> Y	<sup>92</sup> Y	<sup>93</sup> Y
<sup>97</sup> Zr	<sup>95</sup> Nb	<sup>99</sup> Mo	<sup>96</sup> Tc	<sup>97</sup> Tc <sup>m</sup>	<sup>97</sup> Tc	<sup>99</sup> Tc	<sup>97</sup> Ru	<sup>103</sup> Ru	<sup>105</sup> Ru
<sup>105</sup> Rh	<sup>109</sup> Pd	<sup>105</sup> Ag	<sup>111</sup> Ag	<sup>109</sup> Cd	<sup>115</sup> Cd	<sup>115</sup> In <sup>m</sup>	<sup>113</sup> Sn	<sup>125</sup> Sn	<sup>122</sup> Sb
<sup>125</sup> Te <sup>m</sup>	<sup>129</sup> Te	<sup>131</sup> Te <sup>m</sup>	<sup>132</sup> Te	<sup>130</sup> I	<sup>132</sup> I	<sup>134</sup> I	<sup>135</sup> I	<sup>135</sup> Xe	<sup>131</sup> Cs
<sup>136</sup> Cs	<sup>140</sup> La	<sup>141</sup> Ce	<sup>143</sup> Ce	<sup>142</sup> Pr	<sup>143</sup> Pr	<sup>147</sup> Nd	<sup>149</sup> Nd	<sup>147</sup> Pm	<sup>149</sup> Pm
<sup>151</sup> Sm	<sup>152</sup> Eu (9,2 h)	<sup>155</sup> Eu	<sup>153</sup> Gd	<sup>159</sup> Gd	<sup>165</sup> Dy	<sup>166</sup> Dy	<sup>166</sup> Ho	<sup>169</sup> Er	<sup>171</sup> Er
<sup>171</sup> Tm	<sup>177</sup> Lu	<sup>181</sup> W	<sup>185</sup> W	<sup>187</sup> W	<sup>183</sup> Re	<sup>186</sup> Re	<sup>188</sup> Re	<sup>185</sup> Os	<sup>191</sup> Os
<sup>193</sup> Os	<sup>190</sup> Ir	<sup>195</sup> Ir	<sup>191</sup> Pt	<sup>193</sup> Pt	<sup>197</sup> Pt	<sup>196</sup> Au	<sup>198</sup> Au	<sup>199</sup> Au	<sup>197</sup> Hg
<sup>197</sup> Hg <sup>m</sup>	<sup>203</sup> Hg	<sup>200</sup> Tl	<sup>201</sup> Tl	<sup>202</sup> Tl	<sup>203</sup> Pb	<sup>206</sup> Bi	<sup>212</sup> Bi	<sup>220</sup> Rn	<sup>222</sup> Rn
<sup>231</sup> Th	<sup>233</sup> Pa	<sup>239</sup> Np							
Groupe IV: faible toxicité									
<sup>3</sup> H	<sup>15</sup> O	<sup>37</sup> A	<sup>58</sup> Co <sup>m</sup>	<sup>59</sup> Ni	<sup>69</sup> Zn	<sup>71</sup> Ge	<sup>85</sup> Kr	<sup>85</sup> Sr <sup>m</sup>	<sup>87</sup> Rb
<sup>91</sup> Y <sup>m</sup>	<sup>93</sup> Zr	<sup>97</sup> Nb	<sup>96</sup> Tc <sup>m</sup>	<sup>99</sup> Tc <sup>m</sup>	<sup>103</sup> Rh <sup>m</sup>	<sup>133</sup> In <sup>m</sup>	<sup>129</sup> I	<sup>131</sup> Xe <sup>m</sup>	<sup>133</sup> Xe
<sup>134</sup> Cs <sup>m</sup>	<sup>135</sup> Cs	<sup>147</sup> Sm	<sup>187</sup> Re	<sup>191</sup> Os <sup>m</sup>	<sup>193</sup> Pt <sup>m</sup>	<sup>197</sup> Pt <sup>m</sup>	<sup>na1</sup> Th	<sup>232</sup> Th	<sup>235</sup> U
<sup>238</sup> U	<sup>na1</sup> U								

Source: AIEA, 1973.

pour manipuler des sources non scellées de substances radioactives. Toutefois, le système de ventilation devrait être conçu de façon que la circulation de l'air emporte toute matière radioactive en suspension loin des travailleurs. L'air devrait toujours circuler des zones non contaminées vers les zones qui sont ou peuvent être contaminées.

Pour la manipulation de sources non scellées de faible ou de moyenne activité, la vitesse moyenne de l'air passant par l'orifice de la hotte doit être maintenue à environ 0,5 m/s. Dans le cas de sources hautement radiotoxiques ou à haute activité, la vitesse moyenne de l'air devrait être portée à 0,6 à 1,0 m/s. Il ne faut cependant pas perdre de vue que si l'air circule à des vitesses élevées, il risque d'aspirer des matières radioactives se trouvant dans des récipients ouverts et de contaminer ainsi toute la zone de la hotte.

L'emplacement de la hotte dans le laboratoire est important par rapport aux courants d'air. En général, elle devrait être placée

bien à l'écart des prises d'air extérieur ou d'air d'appoint. Une soufflerie à deux vitesses permet d'augmenter la circulation d'air pendant qu'on utilise la hotte, puis de passer à la petite vitesse lorsqu'elle est fermée.

L'objet de tout système de ventilation devrait être:

- d'assurer des conditions de travail confortables;
- de renouveler continuellement l'air (trois à cinq fois par heure) afin d'extraire et de diluer les aérocontaminants;
- de minimiser la contamination des autres zones du bâtiment et de l'environnement.

Lors de la conception des installations radiologiques, on peut réduire les besoins de blindages épais en adoptant certaines mesures simples. Par exemple, dans le cas des installations de radiothérapie, des accélérateurs, des générateurs de neutrons ou des sources de rayonnement panoramiques, un labyrinthe peut souvent remplacer une lourde porte doublée de plomb. En dimi-

Tableau 48.12 • Classification des lieux de travail

Type	Définition	Contrôle de l'accès	Exemples de lieux de travail
1	Zones dans lesquelles les doses absorbées de rayonnement externe ou les niveaux de contamination radioactive peuvent être élevés	Accès limité aux travailleurs sous rayonnement munis d'un équipement de protection adéquat et travaillant dans des conditions strictement contrôlées	Laboratoires chauds, zones hautement contaminées
2	Zones pouvant être soumises à des rayonnements externes et où les risques de contamination radioactive rendent nécessaires des consignes d'exploitation	Accès limité aux travailleurs sous rayonnement munis de vêtements et de chaussures de protection adéquats	Usines de produits luminescents et établissements équivalents
3	Zones dans lesquelles le niveau moyen de rayonnement externe est inférieur à 1 mGy par semaine et où les risques de contamination radioactive rendent nécessaires des consignes d'exploitation spéciales	Accès limité aux travailleurs sous rayonnement. Le port de vêtements de protection n'est pas nécessaire	Locaux de travail dans le voisinage immédiat d'une installation de radiographie, par exemple, une salle de commande
4	Zones d'une installation radiologique dans lesquelles le niveau de rayonnement externe est inférieur à 0,1 mGy par semaine et où aucune contamination radioactive n'est présente	Accès non contrôlé	Locaux administratifs et salles d'attente des malades

Sources: CIPR, 1977; AIEA, 1973.

nuant l'épaisseur de l'écran primaire de radioprotection dans les zones qui ne se trouvent pas directement dans le faisceau utile ou en plaçant l'installation partiellement ou complètement sous terre, on peut réduire sensiblement les besoins de blindage.

Il convient de porter une attention particulière au positionnement des hublots d'observation, des câbles passant dans des canalisations souterraines et des chicanes du système de ventilation. Le hublot d'observation ne devrait intercepter que le rayonnement diffusé. Il vaut d'ailleurs mieux recourir à la télévision en circuit fermé, qui est en même temps plus efficace.

#### Les matériaux de finition

Toutes les surfaces rugueuses — plâtre, béton, bois, etc. — devraient recevoir un revêtement lisse permanent d'un matériau approprié. Le choix de ce matériau doit tenir compte des considérations suivantes:

- la surface doit être lisse et chimiquement inerte;
- le matériau doit pouvoir supporter les conditions ambiantes de température, d'humidité et d'usure mécanique auxquelles la surface peut être exposée;
- il doit être compatible avec les champs de rayonnement auxquels la surface est exposée;
- il doit permettre des réparations rapides en cas de dommages.

Les peintures, vernis et enduits ordinaires ne sont pas recommandés pour les surfaces d'usure. Il pourrait être utile d'envisager un matériau de revêtement pouvant être facilement enlevé en cas de contamination. Il ne faudrait cependant pas perdre de vue que l'enlèvement de tels matériaux peut lui-même s'avérer difficile et être une source de contamination.

#### La plomberie

Eviers, lavabos et drains de sol devraient porter des indications adéquates. Les lavabos à utiliser pour se laver les mains en cas de contamination devraient être équipés de commandes au genou ou au pied. Il pourrait être économique de réduire la maintenance en se servant d'une tuyauterie pouvant être facilement décontaminée ou remplacée, au besoin. Il est préférable, dans certains cas, d'installer des réservoirs souterrains de reprise ou de stockage pour contrôler l'élimination des liquides radioactifs.

#### La conception des écrans de protection

Les écrans sont importants pour réduire l'exposition des travailleurs et du public. Les besoins de protection dépendent de nombreux facteurs, notamment la durée de l'exposition aux sources de rayonnement ainsi que le type et l'énergie des sources et des champs de rayonnement.

Au moment de la conception des écrans de protection, il faudrait s'efforcer autant que possible de placer le matériau écran à proximité de la source. Il importe en outre d'examiner séparément les besoins de protection correspondant à chaque type de rayonnement en cause.

La conception des écrans peut être une tâche complexe. On recourt par exemple à la modélisation informatique pour étudier la protection des accélérateurs, des réacteurs et d'autres sources de rayonnements à haute énergie, mais ce sont là des questions qui débordent le cadre du présent article. Il faudrait toujours faire appel à des experts pour régler les problèmes complexes de protection par écrans.

#### La protection contre les sources de rayons gamma

L'atténuation des rayons gamma est qualitativement différente de celle des rayonnements alpha ou bêta. En effet, ces deux derniers types de rayonnement ont un parcours de longueur déterminée dans la matière et sont complètement absorbés. Il n'en est pas de même des rayons gamma dont l'intensité baisse lorsqu'ils traversent des épaisseurs croissantes d'absorbant, mais qui ne sont jamais complètement absorbés. Si l'atténuation de rayons gamma monoénergétiques est mesurée dans de bonnes conditions de géométrie (c'est-à-dire quand le rayonnement est bien collimaté dans un faisceau étroit), le tracé, sur échelle semi-logarithmique, des données d'intensité en fonction de l'épaisseur de l'absorbant est une ligne droite ayant pour pente le coefficient d'atténuation  $\mu$ .

L'intensité, ou le débit de dose absorbée transmis à travers un absorbant, peut être exprimée par la formule:

$$I_t = I_0 e^{-\mu t}$$

où  $I_t$  est l'intensité des rayons gamma ou le débit de dose absorbée transmis à travers un absorbant d'épaisseur  $t$ .

Les unités de  $\mu$  et  $t$  sont des inverses si l'épaisseur de l'absorbant  $t$  est mesurée en cm, le coefficient d'atténuation linéaire  $\mu$  est

Tableau 48.13 • Classification des laboratoires manipulant des matières radioactives

Groupe de radionucléides	Type de laboratoire prescrit selon l'activité		
	Type 1	Type 2	Type 3
I	<370 kBq	70 kBq à 37 MBq	>37 MBq
II	<37 MBq	37 MBq à 37 GBq	>37 GBq
III	<37 GBq	37 GBq à 370 GBq	>370 GBq
IV	<370 GBq	370 GBq à 37 TBq	>37 TBq
Conditions pratiques d'utilisation des matières radioactives dans le laboratoire			Facteur de multiplication s'appliquant aux niveaux d'activité
Simple entreposage			× 100
Opérations simples en milieu humide (par exemple, préparation d'aliquotes d'une solution-mère)			× 10
Opérations chimiques ordinaires (par exemple, préparations et analyses chimiques simples)			× 1
Opérations complexes en milieu humide (par exemple, opérations multiples ou opérations nécessitant l'utilisation d'une verrerie complexe)			× 0,1
Opérations à sec simples (par exemple, manipulation de composés radioactifs volatils en poudre)			× 0,1
Opérations à sec en milieu poussiéreux (par exemple, broyage)			× 0,01

Sources: CIPR, 1977; AIEA, 1973.

mesuré en cm<sup>-1</sup>. De même, si *t* est exprimé en unités de masse par unité de surface (g/cm<sup>2</sup>),  $\mu$  est alors le coefficient d'atténuation massique désigné  $\mu_m$  et mesuré en cm<sup>2</sup>/g.

On peut dire, comme approximation de premier ordre, qu'à masse surfacique égale tous les matériaux ont les mêmes propriétés d'absorption de photons, tant que l'énergie de ces derniers se situe entre environ 0,75 et 5 MeV (mégaélectronvolts). Dans cet intervalle, la protection contre les rayons gamma est à peu près proportionnelle à la masse surfacique du matériau de l'écran. Dans le cas des photons ayant moins ou plus d'énergie, les absorbants à numéro atomique élevé assurent une protection plus efficace que les absorbants à numéro atomique bas, pour une masse surfacique donnée.

Dans des conditions défavorables de géométrie (par exemple, si le faisceau est large ou l'écran épais), l'équation précédente sous-estimera sensiblement l'épaisseur nécessaire de l'écran parce qu'elle se fonde sur l'hypothèse que chaque photon qui interagit avec l'écran est intercepté et n'est donc pas détecté. En réalité, l'écran peut transmettre au détecteur de nombreux photons diffusés; de plus, des photons diffusés hors du faisceau peuvent y être renvoyés après une deuxième interaction.

Dans des conditions défavorables de géométrie, on peut estimer l'épaisseur nécessaire de l'écran en tenant compte du facteur d'accumulation *B*, qui est calculé comme suit:

$$I_t = I_0 B e^{-\mu t}$$

Le facteur d'accumulation est toujours supérieur à l'unité. Par définition, c'est le rapport de l'intensité du rayonnement électromagnétique primaire et diffusé en un point quelconque du fais-

ceau à l'intensité du seul faisceau primaire au même point. Le facteur d'accumulation s'applique tant au flux de rayonnement qu'au débit de dose absorbée.

On a calculé les facteurs d'accumulation correspondant à différentes énergies de rayonnement et à différents absorbants. De nombreux graphiques et tableaux produits à cet égard donnent l'épaisseur de l'écran en longueurs de relaxation. Cette dernière grandeur représente l'épaisseur d'un écran capable d'atténuer un faisceau étroit d'un facteur égal à 1/e (environ 37%). Par conséquent, la longueur de relaxation est numériquement égale à l'inverse du coefficient d'atténuation linéaire (c'est-à-dire à 1/ $\mu$ ).

L'épaisseur d'un absorbant qui, introduit dans un faisceau de (photons) primaire, réduit le débit de dose absorbée de moitié est dite couche de demi-atténuation (CDA, ou HVL (Half-value Layer)) ou épaisseur de demi-atténuation (HVT, ou Half-value Thickness). La CDA est calculée comme suit:

$$HVL = \frac{\ln 2}{\mu}$$

On peut commencer par estimer l'épaisseur de l'écran antiphotons en supposant des conditions de faisceau étroit ou de bonne géométrie, puis en majorant la valeur obtenue d'une CDA pour tenir compte de l'accumulation.

L'épaisseur d'un absorbant qui, introduit dans un faisceau (de photons) primaire, réduit le débit de dose absorbée à un dixième de sa valeur est dite couche de décitransmission (CDT, ou TVL (Tenth-value Layer)). La CDT est égale à environ 3,32 fois la CDA puisque:

$$\frac{\ln 10}{\ln 2} \approx 3,32$$

On peut trouver des tableaux de la CDA et de la CDT pour différentes énergies de rayonnements photoniques et différents matériaux courants de blindage, comme le plomb, l'acier et le béton (Schaeffer, 1973).

Pour une source ponctuelle, l'intensité ou le débit de dose absorbée est conforme à la loi de l'inverse des carrés et peut se calculer comme suit:

$$\frac{I_1}{I_2} = \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^2$$

*I*<sub>1</sub> étant l'intensité du rayonnement ou le débit de dose absorbée à une distance *d*<sub>1</sub> de la source.

### L'équipement médical et non médical à rayons X

L'équipement à rayons X est considéré sous deux aspects: blindage de la source et protection des locaux. Le blindage de la source est ordinairement fourni par le constructeur de la gaine du tube à rayons X.

Les règlements de sécurité prescrivent un type de gaine protectrice pour les installations médicales de radiodiagnostic et un autre pour les installations médicales de radiothérapie aux rayons X. Dans le cas de l'équipement non médical, l'enveloppe du tube et d'autres parties de l'appareil à rayons X, comme le transformateur, doivent être blindées pour réduire le rayonnement de fuite X à des niveaux acceptables.

Tous les appareils à rayons X, qu'ils soient médicaux ou non, ont des gaines protectrices conçues pour limiter le rayonnement de fuite. Dans les spécifications des gaines, le rayonnement de fuite désigne tout rayonnement autre que le rayonnement utile qui traverse la gaine.

Le blindage des locaux abritant l'équipement à rayons X a pour but de protéger les personnes présentes contre le rayonnement utile ou primaire, le rayonnement de fuite et le rayonnement diffusé. Il entoure tant l'équipement que les personnes ou les objets à irradier.

48. LES RAYONNEMENTS IONISANTS

L'intensité du rayonnement diffusé dépend de l'étendue du champ d'irradiation, de l'énergie du faisceau utile, du numéro atomique effectif du milieu diffusant et de l'angle formé par le faisceau utile incident et la direction de la diffusion.

La charge de travail  $W$  de l'installation constitue un important paramètre de conception:

$$W = EN_v N_p k$$

$W$  étant la charge de travail hebdomadaire, ordinairement exprimée en mA·min par semaine,  $E$  l'intensité du courant dans le tube multiplié par le temps d'exposition par cliché, ordinairement exprimé en mAs,  $N_v$  le nombre de clichés par patient ou par objet irradié,  $N_p$  le nombre de patients ou d'objets par semaine et  $k$  un facteur de conversion (1 min divisée par 60 s).

Le facteur d'utilisation  $U_n$  d'un mur (ou d'un sol ou d'un plafond)  $n$  est un autre paramètre de conception important. Le mur peut servir à protéger n'importe quel local occupé comme une salle de commande, un bureau ou une salle d'attente. Le facteur d'utilisation est donné par la formule:

$$U_n = \frac{N_{v,n}}{N_v}$$

où  $N_{v,n}$  est le nombre de clichés pris pendant que le faisceau primaire de rayons X est orienté en direction du mur  $n$ .

Les exigences de protection des locaux pour une installation donnée de rayons X sont déterminées par les facteurs suivants:

- la tension maximale, en kV (crête), à laquelle fonctionne le tube à rayons X;
- l'intensité maximale, en mA, à laquelle fonctionne le tube à rayons X;
- la charge de travail  $W$ , qui mesure, en unités appropriées (ordinairement en mA·min par semaine), le degré d'utilisation de l'installation à rayons X;
- le facteur d'utilisation  $U$ , qui représente la fraction de la charge de travail durant laquelle le faisceau utile est pointé dans la direction considérée;
- le facteur d'occupation  $T$ , par lequel la charge de travail devrait être multipliée pour tenir compte du degré ou du type d'occupation des locaux à protéger;
- le débit d'équivalent de dose maximale admissible  $P$  pour un individu en zone contrôlée et non contrôlée (les limites habituelles de dose absorbée sont de 1 mGy par semaine en zone contrôlée et de 0,1 mGy par semaine en zone non contrôlée);
- le matériau de blindage (par exemple, plomb ou béton);
- la distance  $d$  entre la source et le local à protéger.

Une fois toutes ces considérations prises en compte, la valeur du rapport ou facteur de transmission  $K$  du faisceau primaire, en mGy par mA·min à 1 m, est donnée par la formule:

$$K = \frac{Pd^2}{WUT}$$

Le blindage de l'installation doit être construit de façon que la protection ne soit réduite ni par les joints et les ouvertures ménagées pour les conduits, tuyaux, etc. devant passer à travers les cloisons, ni par les canalisations ou les coffrets de branchement qui y sont encastrés. Le blindage devrait couvrir non seulement l'arrière des coffrets de branchement, mais aussi leurs côtés, ou s'étendre suffisamment pour assurer une protection équivalente. Les canalisations traversant les cloisons devraient comporter suffisamment de coudes pour atténuer le rayonnement au niveau requis. Les hublots d'observation doivent avoir un blindage équivalent à celui de la cloison (écran) ou de la porte dans laquelle ils sont placés.

Les installations de radiothérapie peuvent nécessiter des dispositifs d'interverrouillage de portes, des voyants lumineux, un sys-

tème de télévision en circuit fermé ou un moyen de communication acoustique (en phonie ou par sonnette) et visuel entre la personne traitée et l'opérateur.

Les écrans de radioprotection sont de deux types:

1. écrans primaires pour atténuer le faisceau primaire (utile) au niveau requis;
2. écrans secondaires pour atténuer le rayonnement de fuite, le rayonnement diffusé et tout autre rayonnement résiduel au niveau requis.

Pour concevoir l'écran secondaire, on doit calculer séparément l'épaisseur nécessaire pour assurer la protection requise contre chacune des composantes. Si ces épaisseurs sont à peu près les mêmes, il suffit d'ajouter une CDA à la plus grande des épaisseurs calculées. Si le plus grand écart entre les épaisseurs calculées atteint ou dépasse une CDA, la plus grande épaisseur calculée devrait suffire.

L'intensité du rayonnement diffusé dépend de l'angle de diffusion, de l'énergie du faisceau utile, de l'étendue du champ ou de la zone de diffusion et de la composition du sujet.

Lors de la conception des écrans secondaires de radioprotection, on peut, par souci de simplification, poser les hypothèses prudentes qui suivent:

1. pour les rayons X produits à 500 kV ou moins, l'énergie du rayonnement diffusé est égale à celle du faisceau utile;
2. après diffusion, le spectre énergétique des rayons X produits à des tensions supérieures à 500 kV se dégrade, devenant alors équivalent à celui d'un faisceau de 500 kV. Le débit de dose absorbée à 1 m et à 90 degrés du diffuseur est de 0,1% de celui du faisceau utile au point de diffusion.

La relation de transmission du rayonnement diffusé s'exprime en fonction du facteur de transmission par diffusion  $K_{\mu x}$  en mGy·m<sup>2</sup> (mA·min)<sup>-1</sup>:

$$K_{\mu x} = \frac{400 Pd_{scat}^2 d_{sec}^2}{aWTFf}$$

$P$  étant le débit hebdomadaire maximal de dose absorbée (en mGy),  $d_{diff}$  la distance entre la cible du tube à rayons X et l'objet (patient),  $d_{sec}$  la distance entre le diffuseur (objet) et le point considéré (que les écrans secondaires sont censés protéger),  $a$  le rapport du rayonnement diffusé au rayonnement incident,  $f$  l'étendue effective du champ de diffusion (en cm<sup>2</sup>), et  $F$  un facteur destiné à tenir compte du fait que l'intensité des rayons X produits augmente avec la tension. Plus  $K_{\mu x}$  est petit, plus les écrans doivent être épais.

Pour les systèmes de radiodiagnostic, le facteur d'atténuation du rayonnement de fuite  $B_{LX}$  est ainsi calculé:

$$B_{LX} = \frac{600 Pd^2 I}{WT} (diagnostic)$$

$d$  étant la distance entre la cible du tube et le point considéré et  $I$  l'intensité du courant dans le tube en mA.

Dans le cas des systèmes de radiothérapie à rayons X fonctionnant à 500 kV ou moins, le facteur d'atténuation requis est donné par la formule:

$$B_{LX} = \frac{60 Pd^2 I}{WT} (radiothérapie: V \leq 500 \text{ keV})$$

Dans le cas des systèmes de radiothérapie fonctionnant à plus de 500 kV, le rayonnement de fuite se limite en général à 0,1% de l'intensité du faisceau utile à 1 m. Dans ce cas, le facteur d'atténuation requis est donné par:

$$B_{LX} = \frac{1000 Pd^2}{WT} \cdot \frac{1}{X_n}$$

où  $X_n$  est le débit de dose absorbée (en mGy/h) à 1 m d'un tube de radiothérapie à rayons X fonctionnant à 1 mA.

Le nombre  $n$  de CDA nécessaire pour obtenir l'atténuation requise  $B_{LX}$  est donné par la formule:

$$B_{LX} = \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

ou

$$n = -\frac{\ln B_{LX}}{\ln 2}$$

**La protection contre les particules bêta**

Il faut tenir compte de deux facteurs dans la conception d'un écran de protection contre un émetteur bêta: les particules bêta elles-mêmes et le rayonnement de freinage (d'après le terme allemand Bremsstrahlung) produit par l'absorption des particules bêta dans la source et dans l'écran. Le rayonnement de freinage consiste en photons X émis lorsque des particules chargées se déplaçant à grande vitesse subissent une décélération rapide.

Par conséquent, l'écran bêta a souvent deux couches: une substance de faible numéro atomique (afin de réduire le rayonnement de freinage produit) d'une épaisseur suffisante pour arrêter toutes les particules bêta, suivie d'une substance de numéro atomique élevé assez épaisse pour atténuer suffisamment le rayonnement de freinage résiduel (en inversant l'ordre des deux couches, on intensifierait à tel point le rayonnement de freinage produit sur la première couche que la seconde pourrait ne pas assurer une protection suffisante).

On peut se servir de la formule suivante pour estimer le danger du rayonnement de freinage:

$$f \approx \frac{6 \times 10^{-4} Z E_\beta}{1 + 6 \times 10^{-4} Z E_\beta}$$

$f$  étant la fraction de l'énergie bêta incidente convertie en photons,  $Z$  le numéro atomique de l'absorbant et  $E_\beta$  l'énergie maximale du spectre bêta en MeV. Pour assurer une protection adéquate, on suppose d'habitude que tous les photons du rayonnement de freinage ont l'énergie maximale.

Le flux du rayonnement de freinage (Bremsstrahlung)  $\Phi$  à la distance  $d$  de la source bêta peut être estimé par la formule suivante:

$$\Phi \approx \frac{f \bar{E}_\beta}{4 \rho d^2 E_\beta}$$

$\bar{E}_\beta$  est l'énergie moyenne des particules bêta, que l'on peut estimer ainsi:

$$\bar{E}_\beta \approx \frac{E_\beta}{3}$$

Le parcours  $R_\beta$  des particules bêta en unités de masse surfacique (mg/cm<sup>2</sup>) peut être estimé à l'aide de la formule suivante pour les particules de 0,01 à 2,5 MeV:

$$R_\beta \approx 412 \cdot E_\beta^{1,265 - 0,0954 \ln E_\beta}$$

$R_\beta$  étant exprimé en mg/cm<sup>2</sup> et  $E_\beta$  en MeV.

Si  $E_\beta$  dépasse 2,5 MeV, le parcours  $R_\beta$  des particules bêta peut être estimé ainsi:

$$R_\beta \approx 530 E_\beta - 106$$

$R_\beta$  étant exprimé en mg/cm<sup>2</sup> et  $E_\beta$  en MeV.

**La protection contre les particules alpha**

Le rayonnement alpha est le moins pénétrant de tous les rayonnements ionisants. Par suite de la nature aléatoire de ses interac-

tions, chaque particule alpha a un parcours qui se situe entre les valeurs nominales indiquées dans la figure 48.18. Dans le cas des particules alpha, le parcours est exprimé de différentes façons: parcours minimum, moyen, extrapolé ou maximum. Correspondant à la particule alpha «moyenne», le parcours moyen est celui que l'on peut calculer avec le plus de précision. C'est aussi celui que l'on utilise le plus souvent.

L'air est le milieu absorbant dont on se sert le plus couramment pour définir la relation parcours-énergie des particules alpha. Pour une énergie alpha  $E_\alpha$  inférieure autour de 4 MeV, le parcours dans l'air  $R_\alpha$  est donné approximativement par:

$$R_\alpha \approx 0,56 \cdot E_\alpha$$

$R_\alpha$  étant exprimé en cm et  $E_\alpha$  en MeV.

Pour une énergie  $E_\alpha$  comprise entre 4 et 8 MeV, le parcours dans l'air  $R_\alpha$  est donné approximativement par:

$$R_\alpha \approx 1,24 \cdot E_\alpha - 2,62$$

$R_\alpha$  étant exprimé en cm et  $E_\alpha$  en MeV.

Le parcours des particules alpha dans des milieux autres que l'air peut être déduit de la relation suivante:

$$R_\alpha (\text{milieu autre que l'air, mg/cm}^2) \approx 0,56 A^{1/3} R_\alpha (\text{dans l'air, cm})$$

$A$  étant le numéro atomique de l'autre milieu.

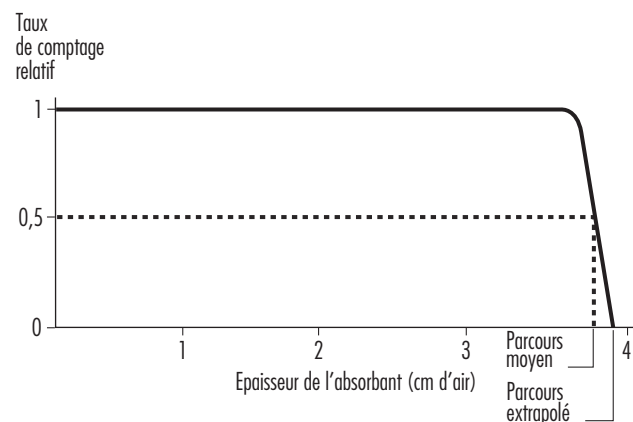
**La protection contre les neutrons**

On peut considérer, en gros, pour le calcul des écrans, que les neutrons atteignent un état d'équilibre énergétique ou thermodynamique et s'y maintiennent après avoir franchi une ou deux longueurs de relaxation dans le matériau d'un écran. Par conséquent, pour un écran de béton ou d'acier d'une épaisseur supérieure à quelques longueurs de relaxation, l'équivalent de dose sera atténué par des longueurs de relaxation de 120 g/cm<sup>2</sup> (béton) ou de 145 g/cm<sup>2</sup> (acier).

Pour absorber l'énergie des neutrons par diffusion élastique, il faut recourir à un écran hydrogéné afin de favoriser au maximum le transfert d'énergie pendant que les neutrons sont modérés (ralentis). Aux énergies supérieures à 10 MeV, les processus inélastiques atténuent efficacement les neutrons.

Comme les réacteurs nucléaires, les accélérateurs à haute énergie doivent avoir un épais blindage pour protéger les travailleurs.

Figure 48.18 • Distribution caractéristique du parcours des particules alpha



48. LES RAYONNEMENTS IONISANTS

La plus grande partie de l'équivalent de dose qu'ils reçoivent est due à l'exposition à des matières activées au cours des travaux de maintenance. Les produits d'activation sont engendrés dans les constituants et le matériel auxiliaire de l'accélérateur.

### **Le contrôle de l'environnement des lieux de travail**

Il importe de distinguer les programmes de contrôle périodique des programmes de contrôle opérationnel de l'environnement des lieux de travail. Chaque programme est conçu pour atteindre des objectifs particuliers. Il n'est donc pas recommandé de concevoir des programmes en fonction de critères généraux.

#### ***Le contrôle périodique des rayonnements extérieurs***

Il importe, dans le cadre d'un programme de contrôle périodique des rayonnements extérieurs en milieu de travail, de réaliser une enquête approfondie chaque fois qu'une nouvelle source de rayonnement ou une nouvelle installation est mise en service ou que des changements importants sont apportés ou pourraient avoir été apportés à une installation existante.

La fréquence du contrôle périodique est déterminée par les changements attendus de l'environnement soumis aux rayonnements. Si les changements apportés à l'équipement protecteur ou aux opérations exécutées dans les lieux de travail sont minimes ou sans conséquence, il est rarement nécessaire de procéder au contrôle périodique des rayonnements pour fins d'examen. Si les champs de rayonnement sont susceptibles d'augmenter rapidement et de façon imprévisible jusqu'à des niveaux dangereux, il est nécessaire d'installer un système de surveillance radiologique et de signalisation de zone.

#### ***Le contrôle opérationnel des rayonnements extérieurs***

La conception d'un programme de contrôle opérationnel dépend dans une large mesure de l'influence que les opérations à exécuter ont sur les champs de rayonnement: s'attend-on à ce que ces champs varient ou demeurent pratiquement constants en fonctionnement normal? La conception détaillée d'un tel programme dépend de façon déterminante de la nature des opérations et des conditions dans lesquelles elles sont exécutées.

#### ***Le contrôle périodique de la contamination de surface***

La méthode classique de contrôle périodique de la contamination de surface consiste à surveiller une fraction représentative des surfaces d'une zone, à une fréquence déterminée en fonction de l'expérience. Si les opérations sont de nature à produire une importante contamination de surface et sont telles que les travailleurs risquent d'emporter sur eux en quittant les lieux de travail des quantités appréciables de matières radioactives en une fois, il faudrait, en sus du contrôle périodique, installer des détecteurs de contamination à la sortie des locaux.

#### ***Le contrôle opérationnel de la contamination de surface***

L'une des formes de contrôle opérationnel consiste à vérifier la contamination de tout ce qui sort d'une zone radiologique contrôlée. Le contrôle doit porter en particulier sur les mains et les pieds des travailleurs.

Les principaux objectifs d'un programme de contrôle de la contamination de surface sont les suivants:

- contribuer à prévenir la propagation de contaminants radioactifs;
- déceler les défaillances du confinement et les entorses aux signes d'exploitation;
- limiter la contamination de surface à un degré tel que des normes générales d'entretien et d'administration interne suffisent pour maintenir l'exposition aux niveaux les plus bas que l'on

puisse raisonnablement atteindre (principe ALARA («As Low As Reasonably Achievable»)) et pour éviter une exposition excessive due à la contamination des vêtements et de la peau;

- donner des renseignements permettant d'établir des programmes optimisés pour les individus, de contrôler la qualité de l'air et de définir les procédures d'exploitation.

### ***Le contrôle des contaminants en suspension dans l'air (aérosols)***

Le contrôle des contaminants radioactifs en suspension dans l'air est important parce que l'inhalation est ordinairement la plus importante source d'absorption de matières radioactives pour les travailleurs sous rayonnement. Il est nécessaire de procéder à un contrôle périodique de ces contaminants sur les lieux de travail dans les circonstances suivantes:

- manipulation d'importantes quantités de produits gazeux ou volatils;
- contamination appréciable et fréquente des lieux de travail par suite de la manipulation de substances radioactives;
- traitement de substances radioactives hautement ou modérément toxiques;
- manipulation de radionucléides à usage médical non scellés dans les hôpitaux;
- fonctionnement de cellules chaudes, de réacteurs ou d'assemblages critiques.

Si l'on juge nécessaire d'établir un programme de contrôle de l'air ambiant, il doit permettre:

- d'évaluer la limite maximale probable d'inhalation de matières radioactives par les travailleurs exposés;
- d'attirer l'attention sur des niveaux imprévus de contaminants en suspension de sorte que les travailleurs exposés puissent être protégés et que des mesures correctrices soient prises.
- de réunir des renseignements suffisants pour planifier des programmes de contrôle individuel de la contamination interne.

Le moyen le plus courant de contrôle des contaminants aériens en suspension consiste à placer des appareils à prélèvement d'air à un certain nombre d'endroits choisis de façon à donner un échantillon représentatif de l'air inspiré par les travailleurs exposés. Il peut s'avérer nécessaire d'obtenir des échantillons plus représentatifs en recourant à des appareils à prélèvement d'air individuels ou pouvant même être portés en boutonnière.

### ***La détection et le mesurage des rayonnements et de la contamination radioactive***

Le contrôle par frottis et l'inspection à l'aide d'appareils de mesure des surfaces de travail, des sols, de la peau et d'autres surfaces ne sont au mieux que des moyens qualitatifs pouvant difficilement donner des résultats quantitatifs précis, les appareils utilisés étant en général plus aptes à la détection qu'au mesurage. Comme les quantités de radioactivité en jeu sont souvent petites, la sensibilité des appareils devrait être élevée.

Le besoin de détecteurs de contamination portables dépend de l'utilisation que l'on veut en faire. Si l'appareil doit servir à un contrôle général des surfaces de travail, il est commode de disposer d'un modèle portable. Par contre, s'il s'agit d'un appareil spécialisé et qu'il est possible de déplacer l'objet à contrôler, un modèle fixe suffit. Les détecteurs servant à contrôler les vêtements, les mains et les chaussures ne sont pas en général portables.

Les compteurs et détecteurs comportent ordinairement un affichage et une sortie sonore ou une prise d'écouteur. Le tableau 48.14 répertorie les appareils qu'il est possible d'utiliser pour détecter la contamination radioactive.