

Partie 1

Éléments généraux de contexte

Chapitre 1

Effets biologiques et sanitaires des rayonnements ionisants – Le système de radioprotection

Puisque, comme cela a été indiqué dès l'introduction, les installations nucléaires et, en particulier, les réacteurs, contiennent des quantités importantes de substances radioactives, il est apparu opportun de rappeler quelques notions sur la radioactivité et de faire un point synthétique sur les connaissances disponibles relatives aux effets biologiques et sanitaires de la radioactivité. Ce sont elles, en effet, qui permettent d'évaluer, au moins globalement, les éventuelles conséquences radiologiques de situations courantes ou anormales et d'établir les principes de base de la radioprotection.

Ce chapitre, volontairement synthétique, s'appuie notamment sur les recommandations de la Commission internationale de protection radiologique, la CIPR, et en particulier sa publication 103⁴, ainsi que sur la présentation de ces effets dans le livre « Les retombées radioactives de l'accident de Tchernobyl sur le territoire français »⁵.

4. « Recommandations 2007 de la CIPR » (103), édition en langue française par J.-C. Nénot, Collection lignes directrices, IRSN, édition TEC & DOC, Lavoisier, 2009.

5. P. Renaud, D. Champion, J. Brenot, Collection sciences et techniques, IRSN, édition TEC & DOC, Lavoisier, 2007.

1.1. Effets biologiques et sanitaires des rayonnements ionisants

1.1.1. Processus biologiques

Le processus d'ionisation d'un atome, arrachement d'un électron périphérique par une particule ou un rayonnement, le modifie, au moins transitoirement, ce qui peut quelquefois endommager la cellule qui le contient. Ce dommage cellulaire peut, s'il n'est pas correctement réparé, empêcher la cellule de survivre ou de se reproduire ou, plus rarement, donner une cellule viable mais modifiée.

Une cellule dont l'ADN⁶ a été lésé (mutation) et qui n'a pas été éliminée peut conduire, après un délai assez long, à un cancer. Les études épidémiologiques montrent que la probabilité de survenue d'un cancer est fonction de la dose reçue. En revanche, la gravité de ce cancer est indépendante de cette dose. On parle alors d'effet « stochastique », aléatoire, pour lequel le lien de cause à effet est de nature probabiliste.

Si les mutations affectent des cellules germinales, il y a risque d'effets héréditaires ou génétiques qui sont, eux aussi, de nature probabiliste. Ces effets, observés sur des animaux, n'ont jamais été mis en évidence sur l'homme.

Si le nombre de cellules détruites est suffisant, il y aura un dégât observable traduisant la perte d'une fonction tissulaire. Au-delà d'un certain niveau d'exposition, appelé seuil, l'atteinte sera évidente et sa gravité augmentera avec la dose. Ce type d'effet est qualifié de déterministe ou certain ou, plus simplement, réaction tissulaire.

Comme on le voit, les conséquences d'une exposition aux rayonnements ne sont pas simples à apprécier. Elles peuvent s'exprimer en probabilité d'un décès, qui peut ne se produire qu'après plusieurs dizaines d'années, ou en certitude d'un effet fonctionnel ou de la mort, si la dose est suffisamment élevée.

#FOCUS.....

Les différents types de rayonnements ionisants

Il existe de nombreux types de rayonnements (couramment appelés rayons), visibles ou invisibles, mais la plupart (radio, téléphonie mobile, micro-ondes) ne sont pas ionisants.

Un rayonnement est une émission d'énergie ou un faisceau de particules. Certains rayonnements (neutrons, X, α , β et γ) sont dits ionisants car ils transportent une énergie suffisante pour transformer les atomes qu'ils traversent

6. Acide désoxyribonucléique: macromolécule biologique présente dans toutes les cellules ainsi que dans de nombreux virus. L'ADN contient toute l'information génétique, appelée génome, permettant le développement, le fonctionnement et la reproduction des organismes vivants.

en ions (un atome qui a perdu ou gagné un ou plusieurs électrons). Les neutrons peuvent aussi être absorbés par des noyaux atomiques. Cela peut rendre la matière instable. Un atome – instable de nature ou après un contact avec un rayonnement – va chercher à se stabiliser en émettant différents rayonnements :

- en perdant des protons et des neutrons : deux protons et deux neutrons (noyau d'hélium) vont constituer le rayonnement α ;
- en transformant un neutron en proton ou vice versa : rayonnement bêta moins β^- ou bêta plus β^+ ;
- en émettant des photons (particules composant la lumière) : rayonnements X et γ ;
- en émettant des électrons mono-énergétiques (conversion interne⁷),

ou subir une réaction de fission nucléaire, conduisant à la formation d'atomes plus légers et à l'émission de neutrons.

Les rayonnements provoquent des effets différents sur l'organisme selon leur type et la dose reçue. L'énergie n'est en effet pas identique pour tous les rayonnements ; les moyens de s'en protéger sont donc différents. Par exemple, une feuille de papier est suffisante pour arrêter les rayonnements α , mais il faut un mètre de béton ou de plomb pour arrêter des rayonnements gamma (figure 1.1.).

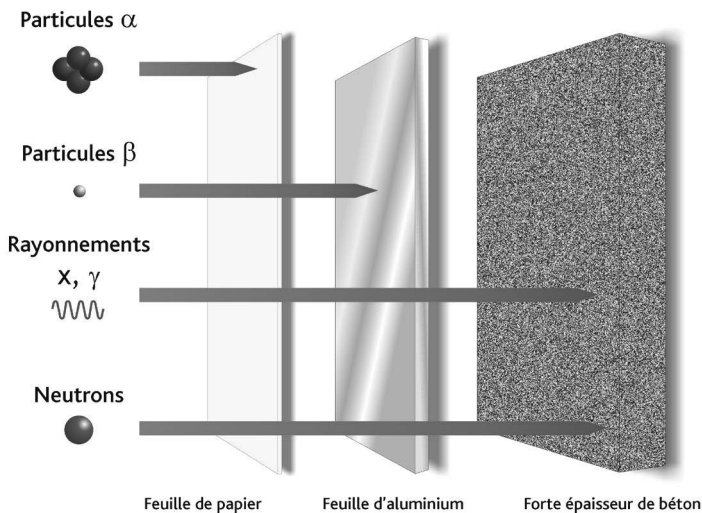


Figure 1.1. Efficacité de quelques protections à l'égard des différents types de rayonnements ionisants. Georges Goué/IRSN.

Dans les centrales électronucléaires, les émetteurs de rayonnement α , qui présentent une efficacité accrue à créer des dommages cellulaires et moléculaires,

7. Voir les travaux de Auger, Coster et Kronig.

posent des problèmes spécifiques en termes de radioprotection des travailleurs (risque de contamination interne) et de rejets (les concentrations des émetteurs α dans les effluents liquides et gazeux doivent rester inférieures aux limites de détection dont les valeurs sont fixées, pour chaque centrale, dans une « décision » de l'Autorité de sûreté nucléaire). En effet, si un émetteur α se retrouve dans un organe ou un tissu contaminé, les dégâts sont importants car le dépôt d'énergie est très élevé localement.

1.1.2. Rappels sur quelques unités

L'unité de radioactivité actuelle est le becquerel (Bq) qui vaut 1 désintégration par seconde. C'est une unité très petite et on utilise très souvent des préfixes multiplicateurs: méga (M) = 10^6 , giga (G) = 10^9 , téra (T) = 10^{12} , péta (P) = 10^{15} ou exa (E) = 10^{18} .

Une ancienne unité était le curie (Ci) qui valait 37.10^9 désintégrations par seconde ou becquerels. Elle a été historiquement définie comme l'activité d'un gramme de radium 226. Cette unité étant relativement grande, on utilisait des préfixes réducteurs: micro (μ) = 10^{-6} , nano (n) = 10^{-9} et pico (p) = 10^{-12} .

$$1 \text{ Ci} = 37.10^9 \text{ Bq ou } 37 \text{ GBq};$$

$$1 \text{ Bq} = 27.10^{-12} \text{ Ci soit } 27 \text{ pCi}.$$

Deux unités expriment l'interaction des rayonnements avec le corps humain.

Le gray (Gy) exprime l'énergie déposée par une particule ou un rayonnement dans de la matière; 1 gray = 1 joule (J)/kilogramme (kg) de matière. C'est l'unité de dose absorbée. L'ancienne unité était le rad (1 Gy = 100 rad).

La nocivité potentielle d'une dose absorbée est d'autant plus grande que le dépôt d'énergie de la particule se fait sur une distance plus petite. On parle ici de transfert d'énergie linéique (TEL) qui s'exprime en Joule.m⁻¹ (ou en keV. μ m⁻¹). On introduit un « facteur de pondération pour les rayonnements » qui permet de déterminer, pour chaque type de rayonnement, une « dose équivalente » dans ses effets à ceux des rayonnements de référence, X ou γ . Le facteur de pondération est, par convention, de 1 pour les électrons et les rayonnements X et γ ; il est de 20 pour les particules α et les noyaux lourds, et varie de 2,5 à 20 pour les neutrons avec un maximum pour les neutrons d'énergie de l'ordre du MeV.

L'unité de dose équivalente est le sievert (Sv). 1 Sv est égal à 1 J.kg⁻¹. Une ancienne unité était le rem (1 Sv = 100 rem).

Concernant les différents effets possibles, chaque tissu et chaque organe ont une sensibilité particulière à l'égard du risque de cancer. Pour 100 cancers mortels observés après une irradiation externe du corps entier, il y a environ 12 cancers du poumon, quatre cancers de la thyroïde et un cancer de la peau par exemple, l'un n'empêchant pas l'autre. On introduit donc un « facteur de pondération pour les tissus » qui permet

de passer de la dose équivalente à une « dose efficace » (en Sv également) moyennée sur le corps entier. Le facteur de pondération des gonades (ovaires et testicules) permet de prendre en compte le risque d'effets héréditaires.

En cas de contamination interne, l'irradiation continue tant que le radionucléide n'est pas éliminé. Il peut l'être par sa propre décroissance radioactive ou par excrétion. En dix jours, la moitié du tritium ingéré est éliminé alors qu'il faut de l'ordre de 100 jours pour le césium. Dans un tel cas, on calcule la « dose engagée » qui résulte de la contamination durant les 50 années qui la suivent pour les travailleurs et jusqu'à 70 ans pour les personnes du public. Règlementairement, cette dose est « créditée » au moment de la contamination.

Doses efficaces et doses engagées s'expriment toutes deux en sieverts.

Dans la suite de ce chapitre, le terme « dose » signifie le plus souvent « dose efficace ».

La relation entre un becquerel et le nombre de grays ou de sieverts qui en résulte dépend donc de l'énergie de la particule ou du rayonnement et du mode d'interaction avec les tissus considérés et, pour la contamination interne, du temps de séjour du radionucléide dans l'organisme.

1.1.3. La radioactivité naturelle

L'humanité est, depuis son origine, exposée à un large spectre de rayonnements ionisants d'origine naturelle. Les expositions sont dues aux rayonnements cosmiques, aux rayonnements telluriques (principalement les rayonnements γ du potassium 40 et des radiums 228 et 226), aux produits radioactifs présents naturellement dans le corps humain, provenant de l'alimentation et de l'eau (principalement le plomb 210, le carbone 14 et le potassium 40), et de l'inhalation (principalement le radon 222).

La dose annuelle due à ces sources naturelles, moyennée sur l'ensemble des populations du globe, se situe entre 2 et 3 millisieverts (mSv). Dans les conditions moyennes d'exposition, les rayons cosmiques, les rayons γ du sol et les produits ingérés ont chacun une contribution voisine, de 0,3 à 0,4 mSv. La part due à l'inhalation de radon est assez nettement supérieure, allant jusqu'à 1,3 mSv en moyenne. Elle est très variable selon les lieux et dépend, en particulier, de la composition du sol, des habitations, des conditions de vie.

Ces valeurs recouvrent de larges variations et des doses locales plus importantes peuvent être observées en divers endroits. Les doses dues aux rayons cosmiques peuvent être jusqu'à cinq fois plus importantes dans des zones habitées de haute altitude. On note localement des doses annuelles dues aux rayonnements γ terrestres qui atteignent 100 mSv. Les doses annuelles les plus élevées sont dues au radon; elles peuvent approcher 1 Sv dans des cas extrêmes correspondant à des concentrations de plusieurs dizaines de milliers de $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$.

En France, la dose moyenne reçue par un individu se situe dans la moyenne mondiale, de l'ordre de $3 \text{ mSv}\cdot\text{an}^{-1}$, du fait du radon, des rayonnements cosmiques et

terrestres et de l'alimentation, mais peut varier de 1 à 15 mSv.an⁻¹ environ. Dans le monde, l'écart peut être encore plus grand.

Des risques pour la santé dus à l'exposition à la radioactivité naturelle ont été mis en évidence pour l'exposition au radon, à des concentrations de l'ordre de 200 Bq.m⁻³ dans l'habitat, ce qui ne signifie pas qu'il n'y ait pas de risques pour des expositions plus faibles.

S'ajoutant à la radioactivité naturelle, l'usage médical des rayonnements à des fins de diagnostic dans les pays développés ajoute une dose individuelle moyenne de l'ordre de 1 mSv par an (3 mSv aux États-Unis, 0,6 mSv en moyenne mondiale). L'exposition volontaire à des fins thérapeutiques qui est, en général, beaucoup plus élevée, n'entre pas dans ce décompte.

1.1.4. Effets sur la santé

Les meilleures sources d'information sur les effets des rayonnements ionisants sont des observations directes des effets sur l'homme. L'étude épidémiologique japonaise sur la vie entière des survivants des bombardements d'Hiroshima et de Nagasaki, dite étude LSS (*Life Span Study*), a une importance particulière, mais n'est pas la seule. Les études épidémiologiques relatives aux patients exposés à des rayonnements pour traitement médical ou pour diagnostic, à certains groupes de travailleurs exposés professionnellement aux rayonnements ou lors d'accidents graves, qu'ils aient eu lieu dans des installations nucléaires ou avec des sources à usages médical ou industriel, sont également utilisées.

Les recherches biologiques sur des micro-organismes, sur des cellules cultivées *in vitro* et sur des animaux donnent, en complément, beaucoup d'informations sur les mécanismes de dommage et sur les relations doses-effets.

L'UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation⁸) effectue le suivi des connaissances sur les effets des rayonnements ionisants à partir des publications scientifiquement reconnues qui contribuent à la compréhension des phénomènes et permettent, autant que faire se peut, d'établir une relation entre doses et effets.

La CIPR se base sur ces connaissances pour recommander un « système » général de radioprotection et actualiser de manière détaillée les facteurs de pondération évoqués plus haut, nécessaires à ce système.

La publication CIPR 103 de 2007 est la publication la plus récente à caractère général. Elle propose une nouvelle approche de la radioprotection, présentée à la fin de ce chapitre, et fait une revue générale des facteurs de pondération. Ces facteurs sont révisés régulièrement pour prendre en compte l'évolution des connaissances scientifiques.

8. Comité scientifique des Nations Unies sur les effets des radiations atomiques.

1.1.4.1. Effets déterministes, réactions tissulaires

Les effets déterministes sont dus à la destruction d'une proportion significative de cellules d'un tissu ou d'un organe. Pour qu'ils se manifestent, il faut que le taux de cellules détruites soit suffisant pour excéder les capacités de réparation du tissu ou de l'organe. La publication 118 de la CIPR⁹ (2012) introduit l'expression « réaction tissulaire » pour décrire ces phénomènes.

L'importance de ces effets augmente avec la dose absorbée.

Pour la plupart des organes humains, le seuil d'apparition d'effets déterministes importants est supérieur ou égal à 1 Gy, mais certains effets peuvent apparaître à partir de 100 mGy. Des sensibilités individuelles peuvent également modifier le niveau du seuil.

Notons qu'à ces niveaux, c'est directement l'énergie absorbée qui compte, donc le nombre de grays, sans influence des facteurs de pondération.

L'expérience permet de préciser les ordres de grandeur suivants pour une exposition du corps entier :

- à partir de 0,1 Gy, stérilité masculine temporaire, dégradation temporaire de la formule sanguine ;
- à partir de 1 Gy, malaises, nausées, grande fatigue, effet immunodépresseur avec risque d'infection ;
- à partir de 2 Gy, érythèmes cutanés, perte des poils et des cheveux, dégradation importante de la formule sanguine, décès d'environ 5 % des personnes concernées en quelques mois ;
- pour 3,3 à 4,5 Gy, le taux de mortalité atteint 50 % ;
- à partir de 5 Gy, brûlures radiologiques de gravité croissante ;
- vers 6 Gy, atteinte gastro-intestinale avec risque d'hémorragie interne ;
- pour 8 Gy, atteinte pulmonaire avec un taux de mortalité de l'ordre de 95 % en quelques semaines ;
- de 15 à 20 Gy, coma, mort cérébrale, décès rapide.

Erythèmes et brûlures de la peau peuvent apparaître même pour une exposition locale comme cela a été observé chez les premiers radiologues.

Pour ce qui concerne le risque de cataracte, le seuil d'apparition a été récemment réestimé. La publication CIPR 118, parue en 2012, retient maintenant la valeur de 0,5 Gy, soit dix fois moins que la valeur retenue jusqu'alors, que l'exposition soit unique ou fractionnée.

9. « Statement on Tissue Reactions and Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs – Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context », ICRP Publication 118, Ann. ICRP 41(1/2), 2012.

1.1.4.2. Effets stochastiques ou aléatoires

Les effets stochastiques (probabilistes, aléatoires) sont associés aux cellules dont l'ADN, endommagé lors d'une interaction avec un rayonnement ionisant, s'est mal réparé, conduisant à une mutation génique.

Il s'agit le plus souvent de cancers dont la gravité est sans relation avec le niveau d'exposition.

La fréquence de ces cancers est plus élevée dans un groupe qui a été exposé que dans un groupe qui ne l'a pas été. La différence des fréquences est d'autant plus importante que la différence des doses est importante. Néanmoins, il n'est pas possible aujourd'hui de différencier un cancer radio-induit d'un cancer lié à un autre facteur de risque ou de prédire qui, dans le groupe exposé, déclarera la maladie.

Les études épidémiologiques et expérimentales prouvent l'existence d'un risque de cancer pour des doses de 100 mSv, voire moins. Comme cela sera vu au paragraphe 1.1.5, le nombre de décès par cancers spontanés et la relative variabilité de ce nombre d'une année à l'autre ne permettent pas de conclure par l'épidémiologie sur l'existence ou l'absence de ce risque pour des doses significativement plus faibles.

Les connaissances sur les processus cellulaires fondamentaux, couplées aux données concernant les relations doses-effets, confortent l'opinion selon laquelle, dans la plage des faibles doses, en dessous d'environ 100 mSv, il est scientifiquement plausible que l'incidence d'effets cancérogènes puisse croître de manière linéaire avec la dose reçue.

La CIPR retient que, **en l'état actuel des connaissances et dans une optique de protection et de réglementation, donc de manière prudente, il convient de retenir à titre prédictif une relation linéaire sans seuil entre doses et effets stochastiques.** Le modèle de relation doses-effets adopté est connu sous le nom de « modèle linéaire sans seuil », en anglais *Linear No-Threshold model* (LNT); il s'applique aux cancers et aux maladies héréditaires.

Les « coefficients de risque nominal » expriment l'excès de risque absolu¹⁰ sur la vie entière pour un groupe de 100 personnes recevant une dose de 1 Sv. Ils ont été réévalués depuis la précédente publication de la CIPR, de 1990 (CIPR 60); la diminution est légère pour les cancers, importante pour les effets héréditaires (tableau 1.1). En effet, il n'existe pas d'effets héréditaires clairement mis en évidence sur l'homme; les estimations sont donc fondées sur l'expérimentation animale. Le très large spectre de gravité des désordres génétiques rend difficile la définition d'un coefficient de proportionnalité; pour des déficiences considérées comme « graves », la CIPR 103 considère un coefficient de 0,2 % par sievert pour l'ensemble de la population.

10. En épidémiologie, le risque absolu est un indicateur de la fréquence d'une pathologie ou d'un événement de santé dans une population donnée. Un risque absolu est souvent exprimé en nombre de cas pour 10 000 personnes. On parle généralement de prévalence (nombre total de cas) ou de taux d'incidence (nombre de nouveaux cas).

Tableau 1.1. Coefficients de risque nominal en $10^{-2} \cdot \text{Sv}^{-1}$ aux faibles débits de dose.

Population exposée	Cancer		Effets héréditaires		Total	
	CIPR 60 (1990)	CIPR 103 (2007)	CIPR 60 (1990)	CIPR 103 (2007)	CIPR 60 (1990)	CIPR 103 (2007)
Ensemble	6,0	5,5	1,3	0,2	7,3	5,7
Adulte	4,8	4,1	0,8	0,1	5,6	4,2

Ce modèle fournit une base prudente pour les besoins pratiques de la protection radiologique préventive. Il ne faut pas s'attacher à la présence de décimales et la commission suggère d'utiliser un facteur global de $5 \% \cdot \text{Sv}^{-1}$. En revanche, elle estime qu'il serait inapproprié de calculer, avec ce facteur, un nombre hypothétique de cas de cancers ou de maladies héréditaires qui pourraient être associés à de très faibles doses reçues par un grand nombre de personnes sur de très longues périodes, par exemple du fait d'un accident.

Les cancers radio-induits surviennent après un temps de latence assez long et les décès se manifestent à partir d'environ 5 ans après l'exposition et, ensuite, sur plusieurs décennies, en particulier pour les cancers « solides ». Les études menées sur les survivants japonais des bombardements atomiques d'Hiroshima et de Nagasaki ont montré que, au début des études systématiques, 5 ans après les explosions, le pic de mortalité par leucémie (cancer de la catégorie « liquide ») était déjà passé.

L'« épidémie » de cancers de la thyroïde d'enfants vivant dans les zones proches de Tchernobyl les plus affectées par les panaches et les dépôts résultant de l'accident a montré que des délais du même ordre s'appliquaient également à l'occurrence de ce type de cancers. Il sera vu au chapitre 34 relatif à l'accident de Tchernobyl que, si ces cancers sont certes nombreux, le nombre de décès associés peut néanmoins être considéré comme faible.

1.1.4.3. Induction de maladies autres que le cancer

Une exposition *in utero* peut affecter le fœtus. Au-delà des premières semaines de grossesse et particulièrement au cours des trois derniers mois, une dose supérieure à $0,1 \text{ Gy}$ reçue par le fœtus peut entraver son développement et le quotient intellectuel de l'enfant peut être affecté.

La publication 118 de la CIPR fait le point sur les effets des rayonnements sur les différents tissus et organes du corps humain à court, moyen ou long terme. Sont traités les systèmes immunitaire, hématopoïétique (système de renouvellement des cellules sanguines), digestif, reproductif, respiratoire, urinaire, musculaire, squelettique, nerveux et cardiovasculaire, ainsi que la peau et les yeux.

L'introduction dans cette liste du système cardiovasculaire est une nouveauté significative, qui reconnaît que des désordres graves de ce système peuvent se produire à moyen ou à long terme après une exposition aux rayonnements. Il s'agit d'une réaction tissulaire et le seuil retenu est de $0,5 \text{ Gy}$, que l'exposition soit unique ou fractionnée. La question était posée depuis les années 1990 mais les dernières études de synthèse

(dont celles de Mark P. Little *et al.*, 2008 et 2010 et celle d'Ozasa *et al.*¹¹, 2012) ont contribué à cette conclusion largement argumentée dans les documents.

Une autre évolution significative concerne la diminution d'un facteur 10 du seuil estimé d'exposition de l'œil susceptible de provoquer une cataracte. C'est maintenant la valeur de 0,5 Gy qui est retenue.

Mark P. Little et 37 autres spécialistes¹² suggèrent, après une revue systématique et une méta-analyse des données disponibles, que les pathologies non cancéreuses provoquées par l'exposition aux rayonnements ionisants pourraient induire autant de décès prématurés que les cancers.

Ces dernières estimations ne sont pas reprises dans la CIPR 118.

1.1.5. Un exemple de limitations de l'épidémiologie

Il est possible d'illustrer les limites de l'épidémiologie à partir des données françaises sur les populations et leur mortalité et, en particulier, leur mortalité par cancers.

De 1979 à 2010, la population française métropolitaine a augmenté assez régulièrement de 53 482 000 à 62 765 000¹³ (voir la figure 1.2). Dans le même temps, le nombre de décès par an diminuait de 540 000 à 530 000¹⁴ mais avec de fortes variations annuelles, marquant ainsi l'augmentation de l'espérance de vie.

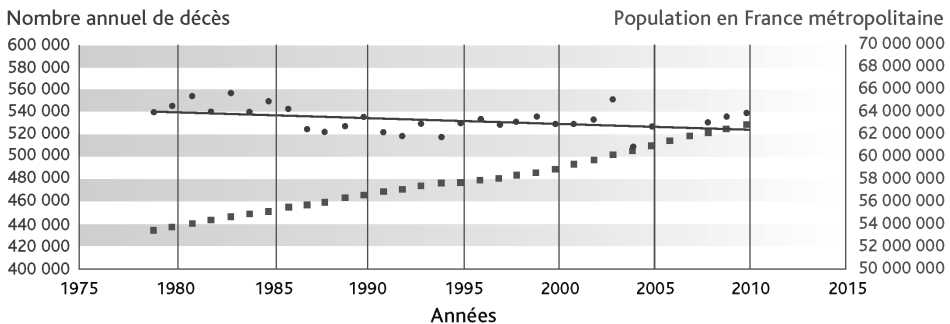


Figure 1.2. Population française métropolitaine et mortalité annuelle. IRSN.

L'Institut national de la santé et de la recherche médicale (INSERM) indique sur son site internet les nombres de décès par cause, par âge et par sexe, ce qui permet de

11. Ozasa *et al.*, « Studies of the Mortality of Atomic Bomb Survivors, Report 14, 1950-2003: An Overview of Cancer and Noncancer Diseases », *Radiation Research*, Vol. 177, 229-243, 2012.
12. Mark P. Little *et al.*, « Systematic Review and Meta-analysis of Circulatory Disease from Exposure to Low-Level Ionizing Radiation and Estimates of Potential Population Mortality Risks », *Environmental Health Perspectives*, Vol. 120, No. 11, November, 2012.
13. Données INSEE arrondies au millier.
14. INSERM, Causes médicales des décès, <http://www.cepidc.inserm.fr>.

suivre les nombres et taux de décès dus aux cancers (classification internationale des maladies, CIM 10, codes C00 à C97).

Les cancers sont la cause d'un tiers des décès, plus pour les hommes que pour les femmes, avec un nombre relativement stable pour les hommes depuis 1995 (voir la figure 1.3). Malgré ces chiffres élevés, les fluctuations annuelles sont supérieures à +/- 1 %.

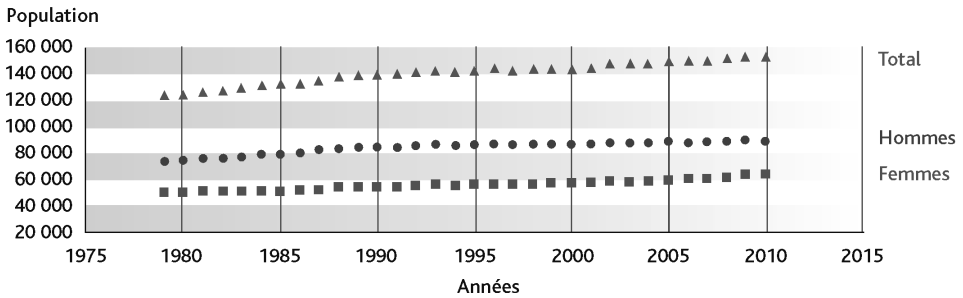


Figure 1.3. Nombre annuel de décès par cancer en France métropolitaine. IRSN.

L'exposition de 600 000 personnes, soit 1 % de la population, à une dose de 10 mSv pourrait provoquer un surcroît de décès par cancer allant jusqu'à 300, qui se manifesteraient, pour certains après quelques années, pour la plupart 20 à 50 ans plus tard, alors que les cancers « spontanés » entraîneraient de l'ordre de 16 000 décès. Le surcroît de cancers lié à l'exposition serait indiscernable.

Pour des cancers spontanés rares comme ceux de la thyroïde des enfants, le seuil de détection peut être plus faible, sans qu'il soit possible de distinguer les cancers radio-induits des autres.

1.2. Le système de radioprotection

Les nombreux cas de leucémies observés chez les radiologues dès la fin des années 1920 – et qui perdurera jusque dans les années 1950 – firent naître une prise de conscience collective des effets des rayonnements ionisants. C'est alors qu'en 1928, au deuxième Congrès international de radiologie à Stockholm, il fut décidé de créer la « Commission de protection contre les rayons X et le radium », qui deviendra en 1950 la Commission internationale de protection radiologique (CIPR).

C'est la CIPR qui est à l'origine du « système » de radioprotection (voir la figure 1.4). L'objectif principal de ce système est de contribuer à un niveau de protection approprié pour les personnes et pour l'environnement contre les effets délétères de l'exposition aux rayonnements ionisants, sans limiter de façon excessive les activités humaines utiles qui peuvent conduire à une telle exposition. S'agissant de la santé humaine, le but est de maîtriser les expositions aux rayonnements ionisants afin d'empêcher la survenue d'effets déterministes et de réduire les effets stochastiques dans la limite du raisonnable.

Pour y parvenir, la CIPR recommande dans sa publication 103 (2007) une approche réalisable et structurée avec trois types de situations d'exposition, trois catégories d'exposition et une application appropriée de trois principes de radioprotection.

Comment s'élaborent les règles de radioprotection ?

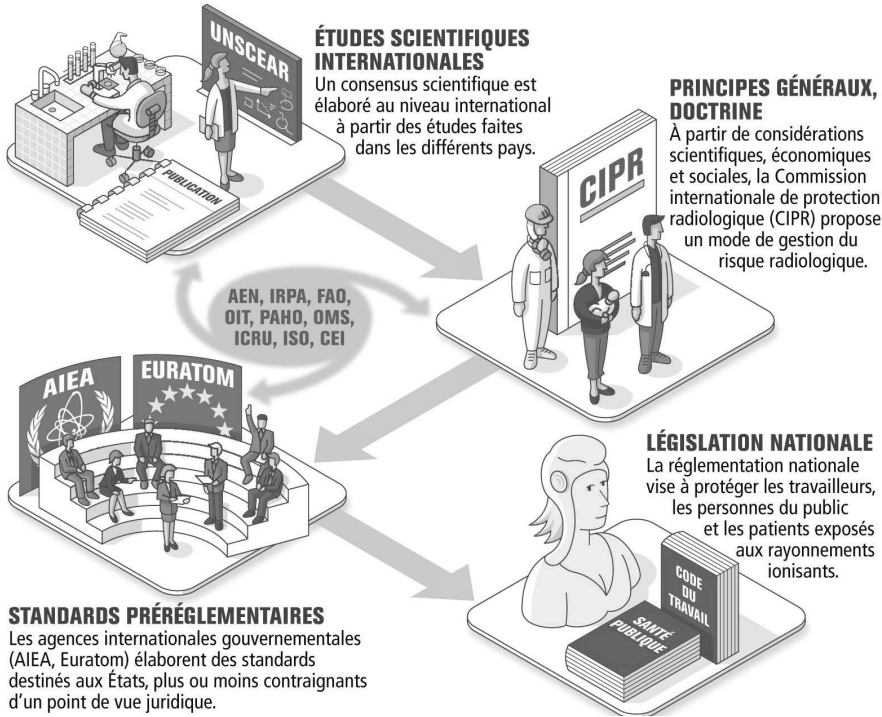


Figure 1.4. Comment s'élaborent les règles de radioprotection.

1.2.1. Types de situations d'exposition

Les situations d'exposition sont très diverses. Dans chacune d'elles, le point de départ est une source de rayonnements; celle-ci entraîne des expositions, reçues par des individus, par différentes voies d'exposition. Le système de radioprotection s'applique aux sources de rayonnements maîtrisables, naturelles ou artificielles. L'état de la source est structurant pour le système; il conduit à distinguer trois types de situations d'exposition.

Les situations d'exposition existante: la source préexiste à la décision de la maîtriser. C'est le cas de la plupart des sources naturelles de rayonnements: radon, rayonnements cosmiques, rayonnements provenant du sol. C'est aussi le cas de l'héritage d'un passé industriel (sites contaminés), ou des suites d'une situation d'urgence

radiologique, c'est-à-dire une situation accidentelle ayant entraîné des rejets de substances radioactives.

Les situations d'exposition existante sont des situations d'exposition chronique dont la gestion repose sur la maîtrise des voies d'exposition plus que de la source elle-même, ce qui n'est pas toujours aisé.

Un autre type de situations correspond aux **situations d'exposition planifiée** : l'introduction et l'utilisation délibérées d'une source de rayonnements, par exemple pour produire de l'électricité, soigner des patients, contrôler l'état d'une soudure... La source est généralement d'origine artificielle mais elle peut être naturelle. Dans ces situations d'exposition planifiée, la source est introduite délibérément. Elle est donc censée être maîtrisée depuis sa conception jusqu'à son élimination. Cela correspond aux différents aspects de l'exploitation normale des installations comportant des sources radioactives de toute nature et dûment autorisées.

Le dernier type de situations correspond aux **situations d'exposition d'urgence** : de telles situations peuvent survenir en cas de perte de contrôle d'une source exploitée dans une situation d'exposition planifiée, ou à la suite d'une action de malveillance ou de toute autre situation imprévue. Elle nécessite une action urgente afin d'éviter ou, à tout le moins, de réduire les conséquences indésirables.

1.2.2. Catégories d'exposition

La CIPR fait la distinction entre trois catégories d'exposition.

L'**exposition médicale** : il s'agit de l'exposition de patients à des fins de diagnostic, d'intervention ou de thérapie. L'exposition est intentionnelle et bénéficie directement au patient. Les caractéristiques des pratiques radiologiques médicales, notamment la relation médecin-patient, requièrent une approche différente de celles qui sont mises en œuvre dans les autres situations d'exposition planifiée.

L'**exposition professionnelle** : il s'agit de l'exposition à l'ensemble des rayonnements que subissent les travailleurs dans le cadre de leurs activités professionnelles. Toutefois, en raison de l'omniprésence des rayonnements, et pour éviter que tout travailleur ne soit soumis à un régime de protection radiologique, la définition des expositions professionnelles est limitée à celles qui sont encourues dans le cadre du travail et qui peuvent être raisonnablement considérées comme étant de la responsabilité du management des activités correspondantes.

L'**exposition des personnes du public** : il s'agit de l'ensemble des expositions qui ne sont ni médicales, ni professionnelles.

Les types de situations d'exposition et les catégories d'exposition peuvent être présentés sous la forme d'une matrice qui structure le système de radioprotection. Bien qu'homogène, celui-ci s'applique en effet de manière adaptée à chacun des cas. Ainsi, les expositions d'un même individu en tant que personne du public, en tant que patient et éventuellement en tant que travailleur exposé aux rayonnements sont gérées de manière distincte, en tenant compte également du type de situation d'exposition.

La gestion des expositions repose sur l'application de trois principes : justification, optimisation, limitation.

1.2.3. Principe de justification

Toute décision qui modifie une situation d'exposition aux rayonnements doit faire plus de bien que de mal. Le principe de justification, relié à la valeur éthique de bienfaisance/non-malfaisance¹⁵, n'est pas propre aux installations ou aux activités qui créent ou utilisent des rayonnements ionisants. Le risque d'exposition aux rayonnements ionisants peut se combiner à d'autres risques. Toute activité comportant des nuisances potentielles pour l'homme – notamment les travailleurs impliqués – et son environnement doit faire l'objet d'une évaluation de ses avantages et de ses inconvénients.

Le principe de justification en radioprotection s'applique dans les trois types de situations d'exposition.

Une liste des activités utilisant des sources de rayonnements considérées comme justifiées est établie et mise à jour au niveau national¹⁶. Il appartient au responsable d'une activité ne figurant pas sur cette liste de démontrer que son activité respecte bien le principe de justification. Les éléments correspondants sont appréhendés dans le cadre de la procédure d'autorisation diligentée par la puissance publique sur la base du dossier présenté par le soumissionnaire et consultation, le cas échéant, des populations.

Une fois son activité justifiée et autorisée, c'est l'exploitant qui est responsable du respect des engagements pris lors de sa demande et de l'application des prescriptions qui lui ont été imposées.

L'exposition médicale de patients fait l'objet d'une approche particulière, en trois temps. Dans un premier temps, l'utilisation médicale de rayonnements est globalement considérée comme justifiée, en l'état actuel des techniques de soins à disposition. Le second temps concerne la justification d'une pratique radiologique médicale particulière ; ce point est d'autant plus important que les techniques et les équipements évoluent très rapidement. Cet aspect de la justification des expositions médicales est traité en concertation avec les organisations professionnelles concernées. Enfin, la justification de l'application d'une pratique radiologique médicale sur un patient particulier est essentiellement de la responsabilité du médecin traitant.

Dans le cas d'une situation d'exposition d'urgence ou existante, c'est la mise en œuvre d'une stratégie de protection qui doit être justifiée.

Certaines expositions sont considérées comme injustifiées. C'est le cas notamment de l'ajout délibéré de substances radioactives dans des produits de consommation tels que la nourriture, les boissons, les produits cosmétiques, les jouets, les bijoux ou les ornements personnels. Les expositions injustifiées sont interdites.

15. Voir à ce sujet la récente publication 138 de la CIPR « Fondements éthiques du système de protection radiologique », 2018.

16. Conformément à l'article L.1333-9 du code de la santé publique.

1.2.4. Principe d'optimisation

Le principe d'optimisation de la protection radiologique est au centre du système de radioprotection. Il vise à atteindre le meilleur niveau de protection possible dans les circonstances en présence. Il s'applique à l'ensemble des situations d'exposition – situations d'exposition existante, situations d'exposition planifiée et situations d'exposition d'urgence – dès lors que le principe de justification a été appliqué. Il s'appuie sur l'hypothèse d'une relation doses-effets linéaire sans seuil aux faibles doses et traduit ainsi la volonté de rester prudent en l'absence d'évidence scientifique (valeur éthique de prudence).

L'optimisation de la protection est définie comme le processus lié à une source permettant de maintenir les doses individuelles, le nombre de personnes exposées et la probabilité d'occurrence d'expositions fortuites aussi faibles que raisonnablement possible¹⁷, compte tenu des facteurs économiques et sociétaux. Toute opération conduisant à des expositions doit être préparée à l'avance (autant que faire se peut dans les situations d'urgence), en intégrant des considérations de nature prospective à l'égard d'éventuels aléas, et l'optimisation se poursuit durant et après l'opération considérée (retour d'expérience).

Les principales étapes sont les suivantes :

- évaluation de la situation d'exposition, y compris les expositions potentielles (celles qui pourraient survenir si l'opération ne se passait pas comme prévu) ;
- sélection d'une borne supérieure appropriée pour restreindre les doses ;
- identification des options de protection possibles ;
- sélection de la meilleure option dans les circonstances en présence ;
- mise en œuvre de l'option choisie ;
- évaluation des résultats ;
- prise en compte de l'expérience acquise pour des opérations ultérieures de même nature.

Le processus d'optimisation est appliqué de façon systématique, structurée, continue et itérative, en s'efforçant de prendre en compte tous les aspects pertinents. Il repose sur des méthodes alliant des aspects quantitatifs et des aspects qualitatifs, et nécessite des jugements.

L'optimisation est un état d'esprit qui conduit à se demander systématiquement si tout ce qui est raisonnable a été mis en œuvre pour réduire les doses. Dans un cadre professionnel, elle nécessite un engagement de tous les acteurs concernés, à tous les niveaux. Pour les cas d'exposition de personnes du public, elle suppose l'implication

17. Principe *As Low As Reasonably Achievable* (ALARA) en anglais. Ce principe, issu de la cyndinique (science du risque), sera formulé pour la première fois en 1977 par la CIPR dans sa publication 26.

de l'ensemble des parties prenantes. L'optimisation de la protection nécessite également des procédures et des ressources adéquates.

La meilleure option est toujours spécifique à une situation d'exposition. Par conséquent, il n'est pas pertinent de fixer *a priori* un niveau de dose en dessous duquel le processus d'optimisation devrait s'arrêter.

L'optimisation de la protection n'est pas une minimisation des doses. La protection optimisée est le résultat d'une évaluation et d'un dialogue, qui comparent soigneusement les risques liés à l'exposition envisagée et les ressources disponibles pour la protection des individus. Ainsi, la meilleure option n'est pas nécessairement celle qui correspond aux doses les plus faibles.

De surcroît, la protection radiologique ne se limite pas aux expositions individuelles, le nombre d'individus exposés doit également être pris en compte. La dose efficace collective est un paramètre clé de l'optimisation de la protection des travailleurs. La comparaison des options de protection dans un objectif d'optimisation doit entraîner la considération attentive des caractéristiques de la distribution des expositions individuelles au sein de la population exposée.

Dans un souci d'équité entre les personnes exposées, le système de radioprotection prévoit de restreindre les doses individuelles par la fixation d'une borne supérieure dans le processus d'optimisation, qui sera déterminée au cas par cas. Une démarche analogue peut aussi être appliquée aux doses collectives.

Dans le processus d'optimisation, la borne supérieure pour une dose individuelle relative à une source donnée est appelée **contrainte de dose** dans les situations d'exposition planifiée et **niveau de référence** dans les autres situations d'exposition (situations d'exposition existante ou d'urgence).

► **Contrainte de dose**

Une contrainte de dose est relative à une source. Elle s'utilise lorsque la source est sous contrôle dès l'origine, les voies d'exposition maîtrisées et les expositions largement prévisibles. C'est le cas des situations d'exposition planifiée.

La contrainte de dose est supposée ne pas être dépassée. Toutefois, malgré son nom (transposition directe du mot anglais *constraint* au sens moins fort que le terme français contrainte), une contrainte de dose n'a pas vocation à devenir un seuil réglementaire; un dépassement conduira à s'interroger, au moins au sein de l'organisme responsable de la source.

Le concept de contrainte de dose a été introduit dans la publication CIPR 60 dans le but d'éviter des disparités dans la distribution des doses individuelles.

► **Niveau de référence**

Un niveau de référence concerne les situations d'exposition d'urgence et les situations d'exposition existante.

Dans ces situations, les expositions sont moins maîtrisables, l'état de la source s'impose aux acteurs de la radioprotection au début du processus d'optimisation. Un niveau de référence sert à cadrer l'intervention, mais il constitue, avant tout, un indicateur. Dans ces conditions et compte tenu des aléas, les doses ne seront pas nécessairement toutes inférieures au niveau de référence fixé préalablement, même à la fin du processus d'optimisation, en fonction de la réussite de la stratégie.

Sur le plan prospectif, la contrainte de dose et le niveau de référence sont utilisés de la même manière. Ils représentent le niveau de dose individuelle **due à une source** au-dessus duquel il est jugé inapproprié d'aller ou de rester. Il s'agit donc d'un niveau de dose au-dessus duquel il est peu probable que la protection soit optimisée. La valeur choisie dépend des circonstances de la situation d'exposition considérée. En pratique, les options de protection qui ne permettent pas de réduire les doses au-dessous de cette valeur sont jugées *a priori* insuffisantes.

Une différence d'utilisation apparaît sur le plan rétrospectif, c'est-à-dire lorsque le processus d'optimisation a été mis en œuvre. Dans le cas d'une situation d'exposition planifiée, la source et les voies d'exposition sont sous contrôle et les expositions sont largement prévisibles de sorte que la contrainte de dose fixée préalablement n'est pas supposée être dépassée même si elle ne constitue pas une limite; un dépassement conduira à s'interroger sur les causes et à en tirer des leçons.

En situation d'exposition d'urgence ou existante, en revanche, la maîtrise de la situation est plus difficile. En particulier, comme cela a été indiqué plus haut, l'état de la source s'impose aux acteurs de la radioprotection au début du processus d'optimisation. Dans ces conditions et compte tenu des aléas, même à la fin du processus d'optimisation, les doses ne seront pas toutes nécessairement inférieures au niveau de référence fixé préalablement. La queue de distribution des doses individuelles pourra même faire apparaître des doses élevées, en fonction des circonstances et des comportements individuels. Le niveau de référence servira donc de repère pour estimer les performances sur le plan rétrospectif et le processus d'optimisation sera poursuivi autant que possible pour réduire le nombre d'individus dont les doses demeurent supérieures au niveau de référence.

Ni les contraintes de dose, ni les niveaux de référence ne représentent une démarcation entre « sûr » et « dangereux ». Il est important de noter que l'optimisation de la protection a pour objectif de réduire les expositions à un niveau aussi bas que raisonnablement possible indépendamment du niveau initial de ces expositions. Ainsi, le processus d'optimisation doit être mené même si les doses sont inférieures à la contrainte de dose ou au niveau de référence, dès lors que sa mise en œuvre apparaît raisonnable.

Contraintes de dose et niveaux de référence sont donc avant tout des outils d'optimisation. Pour les procédures d'imagerie médicale, l'outil correspondant est le « niveau de référence diagnostique », qui permet d'indiquer comment se situent, dans les conditions habituelles, les niveaux des doses reçues par les patients par rapport à un niveau médian pour la procédure considérée.

► Choix des contraintes de doses et des niveaux de référence

La CIPR donne des indications pour le choix de la valeur d'une contrainte de dose ou d'un niveau de référence en fonction des caractéristiques de la situation et des actions de protection que celle-ci requiert (voir le tableau 1.2).

Elle considère tout d'abord qu'une dose supérieure à une valeur de l'ordre de 100 mSv, subie de façon aiguë ou sur une année, justifie presque toujours la mise en œuvre d'actions de protection. En corollaire, il n'est pas approprié de choisir une contrainte de dose ou un niveau de référence qui serait supérieur à cette valeur, quelle que soit la situation.

Cette dose de 100 mSv correspond à une augmentation nominale de la probabilité de cancer de 5 pour 1 000, en application de la relation linéaire sans seuil entre exposition et effets stochastiques. Elle correspond au seuil d'apparition des premières réactions tissulaires chez les personnes les plus sensibles, réactions toutes transitoires à ce niveau. Il ne s'agit donc pas d'un niveau marquant la limite entre une situation sûre et une situation dangereuse.

En dessous de 100 mSv, trois intervalles de doses sont distingués par la CIPR, auxquels correspondent des situations d'exposition de mêmes caractéristiques : moins de 1 mSv, de 1 à 20 mSv et de 20 à 100 mSv. La durée prise en compte est fonction de la situation. Il s'agit en général de l'année. Pour les travailleurs, la contrainte de dose peut être fixée pour la durée d'une intervention particulière. Les principales caractéristiques permettant de positionner une situation d'exposition sur l'échelle de doses ainsi définie sont la plus ou moins grande difficulté à maîtriser la source, les actions de protection que la situation requiert pour des personnes exposées (formation, équipements de protection, suivi dosimétrique...) et le bénéfice tiré de la situation d'exposition (individuel ou sociétal).

La notion de bénéfice tiré d'une situation d'exposition s'apprécie selon la situation. Le seul cas où la personne exposée tire clairement un bénéfice de l'exposition elle-même est celui du patient traité par radiothérapie. Dans tous les autres cas, le bénéfice est tiré de la situation d'exposition, par la personne exposée ou par la société dans son ensemble. Le bénéfice tiré de la situation est individuel dans le cas du patient qui fait l'objet d'un radiodiagnostic ou dans le cas du travailleur exposé professionnellement, par exemple. Il est sociétal dans le cas d'installations industrielles ou médicales qui rejettent des effluents et conduisent à une exposition maîtrisée d'une partie de la population. Lors d'une exposition à la radioactivité naturelle, le bénéfice pour les individus exposés est généralement lié à leur mode de vie (usage de l'avion même s'il soumet les individus aux rayonnements cosmiques, attachement à sa région ou à sa maison même en présence de radon, goût pour les crustacés même s'ils concentrent plus de radioactivité que d'autres aliments). Dans le cas d'une pollution radioactive, personne ne tire bénéfice de la situation, d'où la mise en place de contreparties pour les personnes exposées, en termes de prévention (servitudes d'usage), de protection (éloignement, actions de protection, remédiation, soutien technique ou psychologique...) voire de compensation (indemnisation).

Tableau 1.2. Tableau issu de la CIPR 103 dans sa traduction française.

Intervalles de contraintes/niveaux de référence ^a (mSv)	Caractéristiques de la situation d'exposition	Exigences en termes de protection radiologique	Exemples
de 20 à 100 ^{b, c}	Individus exposés à des sources non contrôlables, ou actions de réduction des doses très perturbantes. Expositions généralement contrôlées par des actions sur les voies d'exposition.	Il faut considérer la réduction des doses. Davantage d'efforts doivent être déployés pour réduire les doses lorsqu'elles avoisinent 100 mSv. Les individus doivent recevoir des informations sur les risques des rayonnements et sur les actions à prendre pour réduire les doses. L'évaluation des doses individuelles doit être entreprise.	Niveau de référence défini pour la dose résiduelle planifiée la plus élevée, subie en cas d'urgence radiologique.
de 1 à 20	Les individus tireront en général parti de la situation d'exposition mais non nécessairement de l'exposition elle-même. Les expositions peuvent être contrôlées à la source ou, sinon, par des actions sur les voies d'exposition.	Si possible, des informations générales doivent être disponibles pour permettre aux individus de réduire leurs doses. Pour les situations d'exposition planifiée, l'évaluation individuelle des expositions et une formation doivent avoir lieu.	Contraintes définies pour les expositions professionnelles dans les situations d'exposition planifiée. Contraintes définies pour le personnel soignant et les accompagnateurs de patients traités par des produits pharmaceutiques radioactifs. Niveau de référence pour la dose planifiée résiduelle la plus élevée due au radon dans les habitations.
moins de 1	Individus exposés à une source ne recevant pas ou peu de bénéfice de la situation, qui, en revanche, en procure à la société en général. Expositions généralement contrôlées par des actions menées directement au niveau de la source, pour laquelle des exigences en termes de protection radiologique peuvent être planifiées à l'avance.	Des informations générales sur le niveau d'exposition doivent être disponibles. Des contrôles périodiques doivent être effectués sur les voies d'exposition comme sur les niveaux d'exposition.	Contraintes pour l'exposition du public dans les situations d'exposition planifiée.

a : dose aiguë ou dose annuelle.

b : dans les situations exceptionnelles, des volontaires informés peuvent recevoir des doses supérieures à 100 mSv pour sauver des vies, pour prévenir des effets graves pour la santé induits par les rayonnements ou pour prévenir le développement de conditions catastrophiques.

c : les situations dans lesquelles le seuil de dose pour les effets déterministes dans les organes ou tissus pertinents pourrait être dépassé nécessiteront toujours la mise en œuvre d'une action.

Tableau 5.2. Cadre pour les contraintes de dose et les niveaux de référence liés à la source, avec des exemples de contraintes pour les travailleurs et pour le public, pour des sources principales uniques, pour toutes les situations d'exposition qui peuvent être contrôlées.

Pour le personnel assurant l'exploitation et la maintenance de sources radioactives en conditions normales, une contrainte de dose dans la gamme de 1 à 20 mSv doit être choisie pour chaque opération. Mais les limites de dose (voir plus loin au paragraphe 1.2.5) réglementaires doivent être respectées pour chaque individu et pour l'ensemble de ses activités. Ces personnes bénéficient de protections et de formations appropriées et d'un suivi dosimétrique et sanitaire individuel.

Dans les situations d'urgence radiologique, c'est-à-dire en situation accidentelle plus ou moins grave, la source n'est plus maîtrisée et il n'est plus possible de rechercher le même niveau de protection. Il n'est possible d'agir que sur les voies et la durée d'exposition. Les niveaux de référence correspondants pourront se situer dans la gamme la plus élevée (20 à 100 mSv).

Toutefois, afin de rester dans des valeurs d'exposition proches de 20 mSv pour les personnes du public, ces dernières pourront être évacuées ou être soumises à des restrictions alimentaires (légumes à feuilles, lait et ses dérivés, champignons, gibiers, poissons locaux) ou d'activité.

Pour les personnels intervenant dans l'installation accidentée, ce sont les équipements et les temps d'intervention qui permettront de limiter l'exposition.

Vu l'urgence des prises de décision dans une telle situation, des équipements et des moyens de mesure aux gammes adaptées doivent être immédiatement disponibles. Cela signifie que des réflexions préalables doivent être menées en considérant la possibilité de situations très dégradées, suivies de l'approvisionnement des équipements correspondants pour chaque installation.

Ce ne sont pas les personnes intervenant dans l'installation ou en dehors qui tirent bénéfice de l'intervention mais la société dans le cas où l'intervention permet de réduire les rejets dans l'environnement. Ces intervenants doivent donc être pleinement informés des risques et exprimer librement et explicitement leur volontariat. Cela concerne en particulier les professionnels extérieurs à l'installation, comme par exemple les pompiers qui seraient amenés à intervenir.

1.2.5. Principe d'application des limites de dose

L'application de limites de dose vise aussi à garantir une certaine équité entre les personnes exposées, dans un contexte où les sources sont maîtrisées et les expositions peuvent être anticipées. Cependant, alors que la contrainte de dose est relative à une source donnée, **la limite de dose est relative à un individu** susceptible d'être exposé à plusieurs sources. Le respect des limites de dose garantit l'absence d'effet tissulaire et évite la prise d'un risque inacceptable d'effets stochastiques pour un individu. La dose totale reçue par un individu, due à l'ensemble des sources autorisées dans le cadre d'un processus réglementaire, dans les situations d'exposition planifiée (prévues lors des processus d'autorisation comme faisant partie des conditions normales d'exploitation) autres que l'exposition médicale en tant que patient, ne doit pas dépasser les limites appropriées. **La limitation s'applique en effet uniquement aux doses qui sont reçues avec certitude dans le cadre des situations d'exposition planifiée.**

Du fait que ces situations doivent être pleinement maîtrisées, les limites de dose ont vocation à être reprises dans les réglementations nationales en tant que niveaux dont le dépassement constitue une infraction. Les valeurs sont restées inchangées depuis la publication CIPR 60 de 1991, sauf la limite de dose équivalente pour le cristallin; la nouvelle valeur recommandée par la CIPR en 2011 pour les travailleurs (20 mSv/an au lieu de 150 mSv/an) a été introduite dans la nouvelle directive EURATOM sur les normes de base en radioprotection (2013/59/EURATOM) (tableau 1.3).

Tableau 1.3. Limites de dose recommandées par la CIPR pour les situations d'exposition planifiée.

Type de limite	Travailleur	Public
Dose efficace	20 mSv par an, moyennée sur 5 ans	1 mSv par an
Dose équivalente pour: – le cristallin – la peau – les mains et les pieds	20 mSv par an 500 mSv par an 500 mSv par an	15 mSv par an 50 mSv par an –

Les valeurs recommandées ci-dessus ont été introduites dans la réglementation française en 2018 (dans le code de la santé publique, dans le code du travail et dans le code de l'environnement), avec une flexibilité moindre pour la limite de dose professionnelle qui est de 20 mSv sur 12 mois consécutifs.

L'expérience montre que les limites de dose sont, comme il se doit, rarement dépassées dans les situations d'exposition planifiée et que, en moyenne, les expositions réelles sont inférieures d'environ un ordre de grandeur à la limite de dose correspondante. De ce fait, la radioprotection consiste en pratique essentiellement en la mise en œuvre du principe d'optimisation, quelle que soit la situation d'exposition.

Vidéos pouvant être consultées pour compléter le chapitre



L'échelle des doses de rayonnement



Les effets des rayonnements sur la santé



Prudence : histoire de la radioprotection



La radioactivité artificielle et la fission

