

# Le principe de limitation des doses et la tolérabilité du risque radiologique

L. Vaillant\* 

CEPN, 28 rue de la Redoute, 92260 Fontenay aux Roses, France.

Reçu le 18 mars 2023 / Accepté le 5 juillet 2023

**Résumé** – Le système de radioprotection vise à protéger l’homme et l’environnement contre les effets nocifs liés à l’exposition aux rayonnements ionisants. Il repose sur 3 principes de gestion : le principe de justification, le principe d’optimisation de la protection et l’application des limites de dose. En ce qui concerne la santé humaine, l’objectif du système est, plus précisément, de prévenir les réactions tissulaires et de maintenir la probabilité d’effets stochastiques à un niveau acceptable, compte-tenu des caractéristiques de la situation d’exposition. Pour les situations d’exposition planifiées, hors exposition médicale, la fixation de limites de dose est nécessaire, non seulement pour atteindre le premier objectif, mais aussi pour contribuer au second. Depuis 1928, la Commission Internationale de Protection Radiologique a développé un système de protection radiologique fondé sur la science, les valeurs et l’expérience, et qui comprend, entre autres, des recommandations portant sur les limites de dose. Cet article a pour but d’explorer la rationalité des valeurs de limites de dose proposées par la Commission.

**Mots clés** : système de radioprotection / limites de dose / optimisation de la protection / tolérabilité

**Abstract** – **The principle of dose limits and the tolerability of radiological risk.** The system of radiological protection aims at protecting humans and the environment against harmful effects associated with ionising radiation exposure. It is based on 3 principles: the principle of justification, the principle of optimisation of protection and the principle of application of dose limits. With regards to human health, the objective of the system is to prevent tissue reactions and to maintain the probability of stochastic effects to an acceptable level, considering characteristics of the exposure situation. For planned exposure situations, except for medical exposures, the setting of adequate dose limits is required not only to achieve to the former, but also to contribute to the latter. Since 1928, the International Commission on Radiological Protection has developed the system of radiological protection which is based on science, values, and experience; and which includes, among others, guidance on dose limits. This article aims at reviewing the rationales behind the Commission proposed values of dose limits.

**Keywords:** radiological protection system / dose limits / optimisation of protection / tolerability

## 1 Introduction

À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, la découverte des rayons X, puis de la radioactivité, ont rapidement conduit au développement des usages de sources de rayonnements ionisants, en particulier dans le domaine médical. Dans les mois qui suivirent ces découvertes, les signalements portant sur les effets potentiellement délétères de ces rayonnements se sont multipliés. Ces observations conduisirent à formuler des principes de prévention.

En 1928, à l’occasion du second congrès international de radiologie à Stockholm, la Commission Internationale de Protection contre les Rayons X et le Radium est créée. De premières recommandations internationales de protection sont publiées le 27 juillet 1928 (ICXPR, 1928). Les effets associés à une surexposition aux rayons X et au radium sont les lésions des tissus superficiels, les troubles des organes internes et les leucémies. Ces effets peuvent être évités, selon la Commission, en limitant la durée de travail des travailleurs exposés aux rayons X et au radium, et donc leur exposition.

Le système de radioprotection qui s’est progressivement mis en place depuis lors sous l’égide de la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) vise à

\*Auteur de correspondance : [ludovic.vaillant@cepn.asso.fr](mailto:ludovic.vaillant@cepn.asso.fr)

protéger l'homme et l'environnement contre les effets délétères liés à l'exposition aux rayonnements ionisants. Il repose sur 3 principes de gestion du risque : le principe de justification, le principe d'optimisation de la protection et l'application des limites de dose.

En ce qui concerne la santé humaine, l'objectif du système est, plus précisément, de prévenir les réactions tissulaires et de maintenir la probabilité d'effets stochastiques à un niveau acceptable, compte-tenu des caractéristiques de la situation d'exposition. Pour les situations d'exposition planifiée, exception faite des expositions médicales, la fixation de limites de dose est nécessaire, non seulement pour atteindre le premier objectif, mais aussi pour contribuer au second.

Depuis 1928, la CIPR a développé un système de protection radiologique fondé sur la science, les valeurs et l'expérience, et qui comporte, entre autres, des recommandations portant sur les limites de dose. Cet article a pour but d'explorer la rationalité des valeurs de limites de dose proposées par la CIPR.

## 2 Premières décennies

Wilhelm Röntgen a annoncé, le 28 décembre 1895, la découverte d'un nouveau type de rayonnement, qu'il baptisa les rayons X. Quelques mois plus tard, Henri Becquerel annonce la découverte de la radioactivité. Rapidement, ces découvertes révolutionnent la médecine et le déploiement de services équipés de générateurs de rayons X est exponentiel. Si le bénéfice est évident, il apparaît rapidement que l'usage des rayons X n'est pas sans danger. Ainsi, le 12 août 1896, le journal *Electrical Review* rapporte que le docteur Hawks, après avoir réalisé une démonstration avec un appareil à rayons X, fût contraint d'arrêter de travailler en raison d'une brûlure cutanée profonde (Sansare *et al.*, 2011). Des effets graves furent également rapportés le 1<sup>er</sup> décembre 1896 par le Laboratoire Edison à propos de deux employés (brûlures profondes des mains et des avant-bras) qui durent cesser de travailler avec les rayons X, sous risque d'être amputés. L'un deux, Clarence Dally, mourut en 1904 d'un carcinome métastatique à l'âge de 39 ans. Il serait le premier travailleur à mourir des suites d'une exposition aux rayons X.

Wolfram Fuchs, pionnier de la radiologie médicale, ouvrit le premier laboratoire de rayons X aux États-Unis à Chicago. Avant la fin de l'année 1896, il avait réalisé plus de 1400 examens radiographiques. Observant les effets potentiellement délétères des rayonnements ionisants, il établit plusieurs recommandations pour réduire le dommage associé à l'utilisation des rayons X (Fuchs, 1896) : faire en sorte que l'exposition soit aussi courte que possible (temps), ne pas placer le tube à rayons X à moins de 30 cm du corps (distance) et frotter soigneusement la peau avec de la vaseline et laisser une couche sur la partie qui sera exposée (écran). Wolfram Fuchs souffrit d'une dermatite sévère, de l'amputation de ses doigts et de ses pouces, et il décéda d'un cancer métastatique en 1907.

En 1928, à l'occasion du second congrès de la Société internationale de radiologie à Stockholm, la Commission Internationale de Protection contre les Rayons X et le Radium est créée. De premières recommandations internationales de protection sont publiées le 27 juillet 1928 (ICXPR, 1928). Les

effets associés à une surexposition aux rayons X et au radium, considérés dans ces recommandations, sont les lésions des tissus superficiels, les troubles des organes internes et les modifications du sang. Ces effets peuvent être évités en adaptant la durée de travail des travailleurs exposés aux rayons X et au radium, en jouant sur la conception des locaux des départements de radiologie (blindage) ou encore par la mise en place et le respect de règles de protection.

En 1934, la Commission produit de nouvelles recommandations (IXRPC, 1934). Elle introduit le concept de dose tolérable sans pour autant le définir précisément et indique que sur la base des données disponibles alors, une personne en bonne santé peut tolérer une exposition aux rayons X de l'ordre de 0,2 röntgens (r) par jour, soit environ 2 mSv par jour et environ 0,5 Sv par an. Cette valeur de dose tolérable ne s'applique pas aux rayonnements gamma du radium. La même dose tolérable est recommandée en 1937 par la Commission (IXRPC, 1938).

La Commission Internationale de Protection contre les Rayons X et le Radium, devenue la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR), élabore en 1950 de nouvelles recommandations à l'occasion du 6<sup>e</sup> congrès international de radiologie (ICRP, 1951). Parmi les effets délétères associés à l'exposition aux rayonnements ionisants, la CIPR établit une liste plus importante que précédemment : lésions superficielles, effets généraux sur l'organisme et sur le sang en particulier (induction d'anémie et de leucémie), induction de tumeurs malignes, cataracte, altération de la fertilité, effets génétiques ou encore réduction de l'espérance de vie. La Commission introduit des critères de dose exprimés en énergie absorbée par l'organe et pondérée par l'efficacité biologique relative des rayonnements. La CIPR propose une dose admissible maximale (ce terme n'est pas alors associé à une définition précise), tout en indiquant : « *Il est fortement recommandé de tout mettre en œuvre afin de réduire les expositions à tous types de rayonnements ionisants au niveau le plus bas possible* ». Pour l'exposition corps entier aux rayons X ou gamma d'énergie inférieure à 3 MeV, la dose admissible maximale est de 0,5 röntgen par semaine (soit environ 250 mSv par an).

En 1954, la CIPR élabore des recommandations qui proposent une dose admissible maximale pour les travailleurs exposés identique à celle de 1950 (ICRP, 1955). La CIPR ajoute par ailleurs « *en cas d'exposition prolongée d'une population, les niveaux maximaux admissibles devraient être réduits d'un facteur 10 par rapport aux niveaux maximaux acceptés pour les expositions professionnelles* ». Il est également à nouveau recommandé « *que l'exposition aux rayonnements soit maintenue au niveau le plus bas possible* ». Il convient de relever la définition de dose admissible maximale, comme suit : « *dose qui, à la lumière des connaissances actuelles, n'est pas censée causer de dommages corporels appréciables à une personne à tout moment de sa vie. Par dommage corporel appréciable on entend toute lésion corporelle ou tout effet qu'une personne considérerait et/ou que les autorités médicales compétentes considéreraient comme préjudiciable à la santé et au bien-être de l'individu* ». *A priori*, et sur la base des connaissances scientifiques d'alors, le respect de la dose admissible maximale permet de prévenir l'occurrence de tout effet nocif pour la santé humaine. Des doses admissibles maximales sont proposées pour les organes

jugés critiques du point de vue de la radioprotection : peau (0,6 rem par semaine ou environ 300 mSv par an), organes hématopoïétiques (0,3 rem par semaine), ovaires et testicules (0,3 rem par semaine) et cristallin (0,3 rem par semaine ou environ 150 mSv par an).

Dans ses recommandations de 1959 (ICRP, 1960), la Commission utilise une nouvelle fois le concept de dose admissible, établissant qu'en pratique, il faut limiter la dose à un niveau qui n'induit pas un risque jugé inacceptable, tant au niveau individuel que collectif : « *Tout écart par rapport au bruit de fond peut entraîner un risque d'effets délétères pour la santé. On suppose donc qu'une exposition prolongée aux rayonnements ionisants d'origine artificielle, en plus de l'exposition aux rayonnements d'origine naturels, comporte un risque. Cependant, l'homme ne peut pas se passer entièrement de l'utilisation de sources radioactives, et le problème en pratique est donc de limiter la dose de rayonnements à un niveau qui implique un risque qui n'est pas inacceptable pour l'individu et pour la population. C'est ce qu'on appelle la dose admissible* ».

Plus précisément, la dose admissible est présentée comme une dose accumulée au fil du temps ou non qui, au regard des connaissances scientifiques, est associée à une probabilité négligeable d'effets somatiques ou génétiques sévères. Les effets pouvant survenir à ce niveau d'exposition sont qualifiés de mineurs et non considérés comme inacceptables pour l'individu exposé et par les autorités médicales compétentes. On relève également « *On peut donc s'attendre à ce que les doses permises produisent des effets qui ne pourraient être détectés que par le biais de méthodes statistiques appliquées à de grands groupes* ».

Pour les expositions professionnelles, la CIPR introduit l'approche suivante pour la dose admissible maximale en rems pour les gonades, les organes hématopoïétiques et le cristallin :  $D = 5(N - 18)$  avec D la dose à l'organe considéré et N l'âge en année. Pour un travailleur, dans sa 19<sup>e</sup> année, la formule implique une dose admissible maximale de l'ordre de 0,1 rem (1 mSv) par semaine. Par ailleurs, la Commission recommande que la dose n'excède pas 3 rems sur 13 semaines consécutives. Pour les autres organes, la Commission recommande une dose maximale à la peau et à la thyroïde de 8 rems sur 13 semaines consécutives ; une dose maximale de 20 rems sur 13 semaines consécutives pour les mains, avant-bras, pieds et chevilles ; une dose maximale de 4 rems sur 13 semaines consécutives pour les organes internes autres que la thyroïde, les gonades et les organes hématopoïétiques. Pour la population résidant à proximité d'une installation, la Commission recommande que la dose totale annuelle pour les gonades, les organes hématopoïétiques et le cristallin n'excède pas 0,5 rem.

### 3 Quantification du risque aux faibles doses et définition de critères dosimétriques

En 1966, la Publication 8 de la CIPR (ICRP, 1966a) porte sur l'évaluation du risque associé à une exposition aux faibles doses (*low doses of radiation*). La Commission indique que connaître l'ordre de grandeur du risque aux faibles doses (*e.g.*, les doses d'intérêt pour la radioprotection) permet de définir

des critères de protection, tout en soulignant les limites et les incertitudes de l'approche. La Commission souligne par ailleurs que des limites de même nature sont rencontrées pour d'autres types de risques. Aux faibles doses (moins de 10 rads par an ou 50 rads de manière aiguë), les effets somatiques considérés sont l'induction de cancer (leucémie, autre néoplasme, cancer de la thyroïde, sarcome osseux), le développement d'anomalies développementales du fœtus et la réduction de l'espérance de vie. La Commission propose, pour les cancers, les estimations de risque suivantes :

- leucémies : 20 décès pour 10<sup>6</sup> personnes exposées à 1 rad (ou 10 mSv) ;
- autres néoplasmes : 20 décès pour 10<sup>6</sup> personnes exposées à 1 rad (ou 10 mSv) ;
- cancer de la thyroïde : 10 à 20 cas pour 10<sup>6</sup> personnes exposées à 1 rad (ou 10 mSv).

La Publication 8 de la CIPR est suivie de nouvelles recommandations générales, également publiées en 1966 (ICRP, 1966b). Le système de radioprotection de la Commission vise à prévenir les effets aigus (dose corps entier de l'ordre de la centaine de rads, *e.g.*, 1000 mSv ou 1 Sv) des rayonnements ionisants et à limiter le risque d'effets tardifs (leucémie, autres cancers, cataracte, dommage de la peau, altération de la fertilité, vieillissement prématuré) à un niveau acceptable. Le terme risque acceptable est défini comme suit « *Toute exposition aux rayonnements est supposée induire un risque d'effets délétères. Cependant, à moins que l'homme ne souhaite renoncer aux activités impliquant une exposition à des rayonnements ionisants, il convient de reconnaître qu'il existe un certain degré de risque, et de limiter la dose de radiation à un niveau auquel le risque supposé est considéré comme acceptable pour l'individu et la société, compte tenu des avantages tirés de ces activités. Une telle dose pourrait être appelée dose acceptable* ».

La Commission précise que toute exposition pouvant comporter un certain degré de risque, il est recommandé d'éviter toute exposition inutile et de maintenir toutes les doses au niveau le plus bas possible, en tenant compte des considérations économiques et sociales. Ainsi, dans la Publication 9, la Commission appuie ses recommandations sur l'hypothèse d'une relation linéaire sans seuil entre la dose et le risque. Cette hypothèse devient la base du système de radioprotection. Dans le cas des travailleurs exposés à une source dite contrôlable et contrôlée, la Commission estime raisonnable de fixer des limitations de dose qui correspondent à un risque jugée suffisamment faible au regard du bénéfice associé à l'utilisation de la source. Par ailleurs, le risque pour les travailleurs ne doit pas excéder celui qui est accepté dans des industries (ou activités de recherche scientifique) jugées sûres. Il en est de même pour le public. Les doses maximales admissibles recommandées par la Commission pour les travailleurs sont reportées dans le [Tableau 1](#) ci-dessous. Les limites de dose pour le public sont fixées à 1/10<sup>e</sup> des doses maximales admissibles pour les travailleurs. La Commission indique également dans la Publication 9 que le nombre de leucémies au sein d'une population exposée à une dose annuelle moyenne de 0,5 rem à la moelle osseuse est de l'ordre de 10 cas par an et par million de personnes exposées (ICRP, 1966b).

**Tableau 1.** Doses maximales admissibles pour les travailleurs et limites de dose pour le public, Publication 9 de la CIPR (1966b).

	Travailleurs	Public
Gonades, moëlle osseuse	5 rems par an (50 mSv)	0,5 rem par an (5 mSv)
Exposition uniforme corps entier	5 rems par an (50 mSv)	0,5 rem par an (5 mSv)
Peau, thyroïde, os	30 rems par an (300 mSv)	3 rems par an (30 mSv)
Mains, avant-bras, pieds, chevilles	75 rems par an (750 mSv)	7,5 rems par an (75 mSv)
Autres organes	15 rems par an (150 mSv)	1,5 rems par an (15 mSv)

#### 4 Comparaison des risques comme base de la définition des limites de dose

La Publication 26 de la CIPR (ICRP, 1977) a établi les bases du système de radioprotection actuel. La Commission distingue les effets stochastiques, dont la probabilité augmente avec la dose (et sans seuil) (Laurier *et al.*, 2023) et les effets non stochastiques, dont la sévérité augmente avec la dose, pour lesquels il peut y avoir un seuil. Les effets affectant l'individu exposé sont dits somatiques, les effets affectant la descendance de l'individu exposé sont dits héréditaires. Le système de radioprotection vise à prévenir les effets non stochastiques et à limiter le risque d'effet stochastique à un niveau raisonnable. Le premier objectif est atteint en fixant des limites de dose à un niveau suffisamment bas pour ne pas atteindre le seuil, même après une exposition vie entière. Le second objectif est atteint en maintenant toutes les expositions justifiées à un niveau aussi bas que raisonnablement possible sous les limites, en tenant compte des facteurs économiques et sociaux. La Commission introduit le concept de détriment pour quantifier les effets délétères associés à une exposition aux rayonnements ionisants. À des fins de radioprotection, la Commission estime que le risque de décès associé aux cancers est de  $1 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$  et que le risque d'effets héréditaires sévères est de  $0,4 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ .

Dans la Publication 26, la Commission propose (pour les travailleurs exposés) de juger de l'acceptabilité du risque associé à une exposition en comparant ce risque à celui observé dans des industries ayant des normes de sécurité perçues comme élevées. Dans les industries sûres, le risque annuel de décès est en moyenne inférieur ou égal à  $10^{-4}$ . Ainsi, la Commission estime que le taux moyen calculé auquel des tumeurs malignes mortelles pourraient être induites par l'exposition professionnelle aux rayonnements ne devrait pas dépasser  $10^{-4}$ , soit environ 5 mSv. La Commission estime que la mise en œuvre de ses recommandations se traduit par l'exposition moyenne pour les travailleurs égale au  $1/10^6$  de la limite. À ce sujet, Steward explique « Dans des branches particulières comprenant un nombre élevé de travailleurs auxquelles s'appliquent les recommandations de la Commission, la distribution en fréquence des doses reçues est bien représentée par une fonction de distribution lognormale caractérisée par un écart-type géométrique de 2,5 ou plus. Les limites de dose sont rarement dépassées, la fréquence étant de l'ordre de  $10^{-3}$ . Si l'on suppose que cette fréquence correspond aux limites de dose dans la distribution, alors le rapport de la limite de dose à la dose moyenne du groupe sera au moins de dix » (Steward, 1978). À partir de ces considérations, la Commission recommande, pour les travailleurs, une limite de dose annuelle de 50 mSv. Il est important

de souligner ici que si la limite de dose pour les travailleurs est fixée à 50 mSv par an, la dose jugée acceptable (et donc l'objectif de protection) pour un travailleur est de 5 mSv. La Commission reconduit donc la limite de dose de la Publication 8, mais en s'appuyant sur un argumentaire différent. La Commission estime que les effets non stochastiques peuvent être évités en appliquant une limite de dose annuelle équivalente à chaque organe de 0,5 Sv, à l'exception du cristallin (0,3 Sv). Pour les effets stochastiques, la Commission recommande un système de limitation de la dose fondé sur le principe que le risque doit être identique que le corps soit irradié uniformément ou non. L'objectif de limitation est atteint si :

$$\sum_T w_T H_T \leq H_{wb,L}$$

Avec  $w_T$  facteur de pondération qui représente la contribution de l'organe T au détriment,

$H_T$  la dose annuelle équivalente à l'organe T,

$H_{wb,L}$  la limite annuelle de dose recommandée pour l'exposition uniforme corps entier (50 mSv).

Pour juger du caractère acceptable du risque d'occurrence d'un effet stochastique pour le public, la Commission s'appuie sur le constat que le niveau d'acceptabilité des risques létaux pour le public est un ordre de grandeur inférieur à celui des risques professionnels. Un risque de l'ordre de  $10^{-6}$  à  $10^{-5}$  par an est ainsi jugé comme probablement acceptable pour un membre du public, soit une dose de l'ordre de 0,5 mSv par an. Sur cette base, la Commission recommande une limite de dose de  $5 \text{ mSv} \cdot \text{an}^{-1}$  pour le public. Ainsi, comme indiqué par Sugier « La comparaison des risques liés à ces doses avec ceux de la vie courante permet de juger de leur acceptabilité : le niveau de risque est comparable, pour les travailleurs à celui des professions les plus sûres, et pour les personnes du public à celui de la vie de tous les jours » (Sugier *et al.*, 2005).

#### 5 Introduction du modèle de tolérabilité du risque

En 1990, la CIPR élabore à nouveau des recommandations générales (ICRP, 1991). L'objectif du système de radioprotection est réaffirmé, ainsi que les 3 principes fondamentaux :

- justification d'une pratique : aucune pratique impliquant une exposition aux rayonnements ne devrait être adoptée, à moins qu'elle ne produise un bénéfice suffisant pour les individus exposés ou pour la société afin de compenser le préjudice radiologique qu'elle cause ;

- optimisation de la protection : l'ampleur des doses individuelles, le nombre de personnes exposées et la probabilité d'être exposé doivent être maintenus aussi bas que raisonnablement possible, en tenant compte des facteurs économiques et sociaux ;
- limites de dose : l'exposition des individus est soumise à des limites de dose. Ces limites visent à garantir qu'aucun individu n'est exposé à des risques d'irradiation jugés inacceptables du fait des pratiques dans des circonstances normales. Toutes les sources ne sont pas susceptibles d'être contrôlées par une action à la source et il est nécessaire de spécifier les sources à inclure avant de choisir une limite de dose.

La Commission, en s'appuyant sur la mise à jour des connaissances scientifiques, propose une méthode de calcul du détriment plus complexe que dans la Publication 26 et dont la mise en œuvre se traduit par une augmentation significative du détriment. Le détriment (qui traduit quantitativement le risque de décès par unité de dose efficace) est ainsi estimé à  $5,6 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$  pour les travailleurs (multiplication par 4) et à  $7,3 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$  pour le public (multiplication par 5), et ce malgré l'introduction d'un facteur d'efficacité de la dose et du débit dose (DDREF) qui se traduit par une division par 2 des coefficients de risque nominaux (et donc du détriment).

La Commission explique introduire une nouvelle approche pour établir la limite de dose pour les travailleurs, car celle retenue en 1977 (comparaison des taux de décès dans les industries) n'est plus jugée satisfaisante. L'objectif de la Commission est ainsi d'établir un niveau de dose au-delà duquel les conséquences pour l'individu seraient considérées comme (largement) inacceptables. La Commission propose de juger du degré de tolérabilité d'une exposition à l'aide de 3 termes. Ces termes sont subjectifs et doivent être interprétés au regard des caractéristiques de la situation d'exposition : « *Le premier terme est inacceptable, qui est utilisé pour indiquer que l'exposition ne serait, de l'avis de la Commission, acceptable sur aucune base raisonnable dans le cadre de l'exploitation d'une installation ou d'une source en situation normale. De telles expositions ne pourraient être acceptées que dans des situations exceptionnelles, par exemple lors d'accidents. Les expositions qui ne sont pas inacceptables sont subdivisées en expositions tolérables, ce qui signifie qu'elles ne sont pas les bienvenues, mais peuvent être raisonnablement tolérées et en expositions acceptables, ce qui signifie qu'elles peuvent être acceptées sans action supplémentaire, c'est-à-dire lorsque la protection a été optimisée.* »

La Commission précise que la limite de dose (pour les pratiques) représente la frontière entre un niveau de risque inacceptable et un niveau de risque tolérable : en d'autres termes, les limites permettent de prévenir un détriment excessif pour l'individu exposé (Fig. 1).

Si le détriment peut être utilisé pour quantifier les effets nocifs pour la santé humaine d'une exposition, il reste néanmoins, selon la Commission, difficile de juger du caractère tolérable de celle-ci sur la base de ce seul critère. Aussi, afin d'établir une base quantitative pour le choix de la limite de dose, la Commission indique s'appuyer sur un panel de critères : probabilité de décès vie entière, années de vie perdues associées à un décès par cancer, réduction de

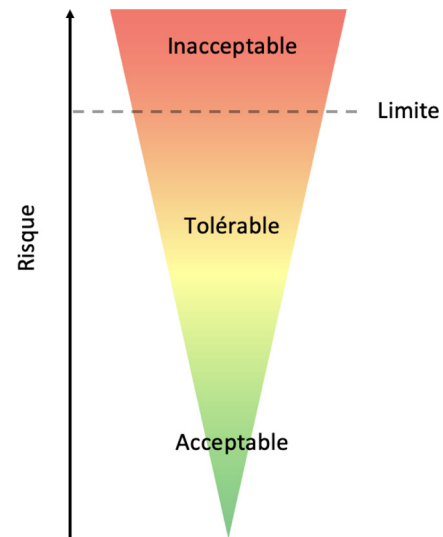


Figure 1. Risque inacceptable, tolérable, acceptable et limite.

l'espérance de vie, etc. La Commission a quantifié ces facteurs pour différentes valeurs de doses, 10, 20, 30 et 50 mSv par an (soit une dose « professionnelle » vie entière de 0,5, 1, 1,4 et 2,4 Sv). Certains de ces éléments sont présentés dans le [Tableau 2](#).

La Commission estime que pour les travailleurs, sur la base des calculs réalisés, une dose annuelle de 50 mSv, correspondant à une dose efficace de 2,4 Sv (de 18 à 64 ans), est trop élevée : la réduction de l'espérance de vie à 18 ans (1,1 années) et la probabilité de décès sont considérées excessives. Par ailleurs, « *la Commission a estimé que la limite de dose efficace devrait être fixée de telle manière et à un niveau tel que la dose efficace totale reçue au cours d'une vie professionnelle ne puisse excéder environ 1 Sv et que l'application du système de radioprotection devrait être telle que ce chiffre ne soit en pratique que rarement approché. La décision finale quant au choix des limites, et la manière dont elles doivent être exprimées, sont également influencés par la manière dont les limites seront appliquées en pratique. La nécessité de veiller à ce que les limites assurent une protection contre les effets déterministes doit également être prise en compte.* »

La Commission juge que la limite de dose doit être fixée de manière que la dose totale reçue au cours de la vie professionnelle n'excède pas 1 Sv. Finalement, la Commission choisit de fixer la limite de dose efficace à  $20 \text{ mSv} \cdot \text{an}^{-1}$  en moyenne sur 5 ans, la dose efficace annuelle ne devant en aucun cas dépasser  $50 \text{ mSv} \cdot \text{an}^{-1}$ . La Commission ne recommande pas d'utiliser une limite de dose vie entière pour les travailleurs. Par ailleurs, la Commission insiste sur le fait que la limitation des doses n'est que l'un des aspects du système de radioprotection, dont l'objectif n'est pas uniquement le respect d'une limite de dose, mais l'atteinte d'un niveau de protection jugé acceptable au regard des caractéristiques de la situation d'exposition.

Le respect de la limite de dose efficace proposée par la Commission permet d'éviter (de prévenir) les effets déterministes, exception faite des effets sur le cristallin et la peau, pour lesquels la Commission recommande une limite de dose équivalente de 0,15 Sv et de 0,5 Sv.

**Tableau 2.** Exemple d'indicateurs de risque radiologique, exposition corps entier, population 18–65 ans, DDREF 2 (ICRP, Publication 60).

Indicateur	Dose annuelle (mSv)			
	10	20	30	50
Probabilité vie entière de cancer léthal attribuable (%) <sup>*</sup>	1,16	2,31	3,44	5,66
	1,81	3,57	5,28	8,56
Perte d'espérance de vie en cas de décès par cancer (années) <sup>*</sup>	19,8	19,8	19,9	20,0
	12,7	12,7	12,8	13,0
Perte d'espérance de vie à 18 ans (années)	0,2	0,5	0,7	1,1

<sup>\*</sup> modèle de calcul du risque additif en haut, modèle de calcul du risque multiplicatif en bas.

Dans ses dernières recommandations générales (ICRP, 2007), la Commission réaffirme une nouvelle fois l'objectif, du point de vue de la protection de l'homme, du système : « *Le système de radioprotection de la Commission vise à protéger la santé humaine. Ses objectifs en matière de santé sont relativement simples : gérer et contrôler les expositions aux rayonnements ionisants de manière à prévenir les effets déterministes et à réduire les risques d'effets stochastiques aussi bas que raisonnablement possible* ». La Commission reconduit par ailleurs, les limites de dose de la Publication 60, tant en termes de dose efficace que de dose équivalente à la peau et au cristallin. Ces limites, applicables aux situations d'exposition planifiées, sont reportées dans le Tableau 3. On relève que dans la Publication 103, les termes tolérable ou tolérabilité ne sont plus mentionnés. La sélection des limites de doses est présentée comme découlant d'une approche multicritère, et impliquant un jugement de nature sociétale.

## 6 Évolution des connaissances sur les réactions tissulaires

En 2012, la Commission a publié un rapport (Publication 118) mettant à jour les doses seuils pour les réactions tissulaires (précédemment effets déterministes) (ICRP, 2012). Le seuil de dose pour une réaction tissulaire donnée est la dose qui correspond à 1 % d'incidence de la réaction tissulaire et intègre donc, dans une certaine mesure, la prise en compte de la variation de la sensibilité aux rayonnements ionisants des individus au sein d'une population.

La relation entre la dose (en Gy), la fréquence et la gravité d'une réaction tissulaire est décrite dans la Figure 2 (extraite de la Publication 118 de la CIPR). Cette Figure illustre en partie basse, pour un individu, l'augmentation de la gravité d'une réaction tissulaire avec la dose (à l'organe considéré). Elle montre également que la fréquence d'une réaction tissulaire au sein d'une population croît avec la dose (en partie haute).

La Publication 118 introduit des évolutions significatives pour la cataracte et les maladies circulatoires. En ce qui concerne ces dernières, la Commission indique que les données scientifiques (et en particulier de l'épidémiologie) permettent d'établir un seuil de dose à environ 0,5 Gy pour les maladies cardiovasculaires et les maladies cérébrovasculaires. Une dose de 0,5 Gy (au cœur ou au cerveau) peut donc conduire à ce qu'environ 1 % des individus exposés développent la maladie en question (au-delà de 10 ans après l'exposition). La définition du seuil de dose de 0,5 Gy pour les

**Tableau 3.** Limites de dose recommandées par la CIPR pour les situations d'exposition planifiées (ICRP, 2007).

	Travailleurs	Public
Dose efficace	20 mSv par an, moyennée sur 5 ans	1 mSv par an
Dose équivalente		
Cristallin	150 mSv	15 mSv
Peau	500 mSv	50 mSv
Bras et pieds	500 mSv	-

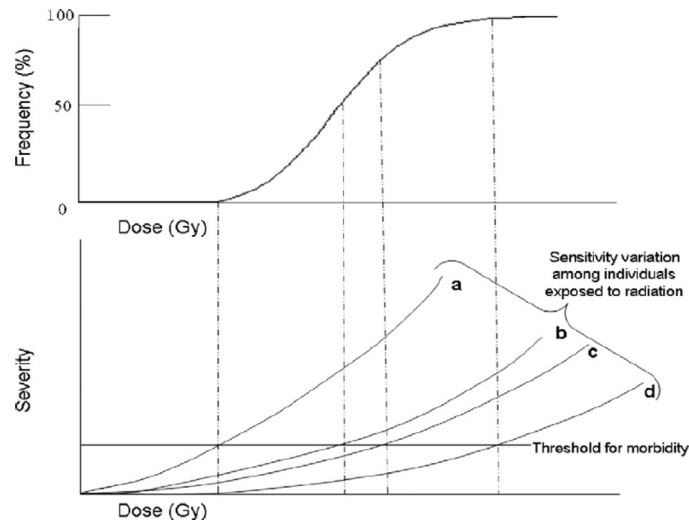
maladies du système circulatoire est fondée sur des résultats épidémiologiques et détaillée dans la Publication 118 (elle est fondée sur un excès de risque relatif de 0,08 Gy<sup>-1</sup> et un taux d'incidence de 30 à 50 %). La valeur numérique retenue pour le seuil de dose soulève la question du statut de la limite de dose efficace, puisqu'il n'est plus possible d'affirmer que la (seule) limitation de la dose efficace permet de prévenir les réactions tissulaires.

Pour le cristallin, le seuil est fixé à 0,5 Gy. En conséquence, pour les expositions professionnelles, la Commission recommande une limite de dose équivalente pour le cristallin de 20 mSv par an en moyenne sur 5 ans, sans excéder 50 mSv sur une année, soit une réduction de la limite de dose équivalente au cristallin d'un facteur 7,5.

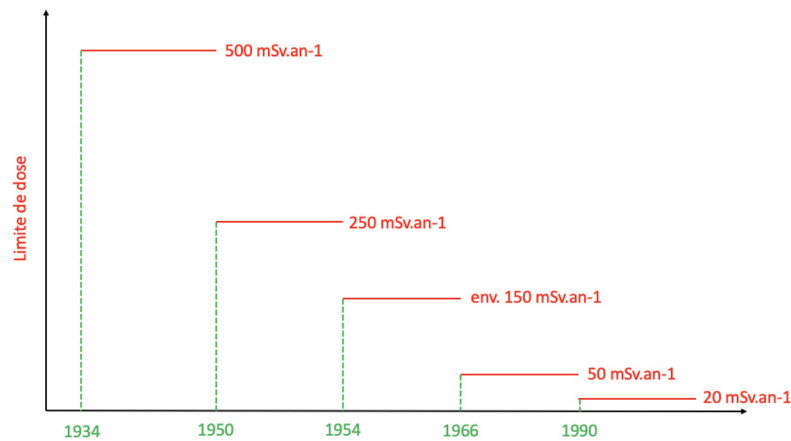
Ces évolutions renforcent, du point de vue de la Commission, l'importance de l'optimisation de la protection radiologique : « *Compte-tenu de l'évolution des connaissances, la Commission souligne par ailleurs que la protection doit être optimisée non seulement pour les expositions du corps entier, mais également pour l'exposition de tissus spécifiques, en particulier le cristallin, le cœur et le système cérébrovasculaire* ». Il convient également de souligner que la limite de dose efficace pour les travailleurs ne peut plus être présentée comme permettant de prévenir les réactions tissulaires. En effet, une dose vie professionnelle de l'ordre de 0,8 Sv, soit 40 ans à 20 mSv.an<sup>-1</sup>, est supérieure au seuil retenu pour le cristallin, le cœur ou le cerveau.

## 7 Discussion

Le principe de limitation des doses est l'un des trois principes structurants du système de radioprotection. Il s'agit



**Figure 2.** Relation entre la dose et la gravité d’une réaction tissulaire (bas) et la dose et la fréquence d’occurrence au sein d’une population d’une réaction tissulaire (haut) (ICRP, 2012).



	Concept	Valeur (corps entier)
1934	Dose tolérable	0,2 roentgen.j-1 soit 500 mSv.an-1
1950	Dose admissible maximale	0,5 roentgen.semaine-1 soit 250 mSv.an-1
1954	Dose admissible maximale	0,3 rem.semaine-1 soit 150 mSv.an-1
1966	Dose acceptable	5 rem.an-1 soit 50 mSv.an-1
1990	Limite de dose	100 mSv sur 5 ans sans excéder 50 mSv.an-1

**Figure 3.** Évolution du concept de limite de dose corps entier et de sa valeur.

du premier principe de gestion du risque radiologique introduit par la CIPR. Il a connu diverses dénominations : dose tolérable, dose admissible maximale, dose admissible, limitation de dose ou limites de dose. Indépendamment de la dénomination retenue, la limite de dose corps entier a évolué de manière significative, avec l’évolution des connaissances scientifiques, au cours du siècle dernier (Fig. 3). La limite de dose ne s’applique qu’en situation d’exposition planifiée et hors

exposition médicale. Elle vise à prévenir l’occurrence de réactions tissulaires et à éviter que l’individu, travailleur ou membre du public, soit exposé à un niveau de risque jugé inacceptable.

Dans les années 1920, et jusqu’à la fin des années 1950, le principe de limitation des doses a pour objet de prévenir les réactions tissulaires (ou effets déterministes). Il constitue le pilier du système de radioprotection, et les restrictions de dose

sont associées, en particulier, aux organes sensibles ou critiques comme les organes hématopoïétiques, le cristallin ou encore la peau.

Les connaissances sur les effets nocifs des rayonnements ionisants sur la santé humaine ont progressé, en particulier avec la prise en compte des effets stochastiques. La Publication 26 de la CIPR (1977) fixe une valeur de la limite de dose efficace en s'appuyant sur le concept de détriment (évalué pour les effets stochastiques) et sur la notion de risque acceptable. Pour les travailleurs, la valeur de la limite (50 mSv par an) correspond à un niveau de risque égal à 10 fois le risque jugé acceptable dans des industries jugées sûres. La limite de dose pour le public est fixée au 1/10<sup>e</sup> de la limite de dose pour les travailleurs. Le respect de la limite permet également de prévenir l'occurrence des effets déterministes. Des limites de dose équivalentes sont proposées pour la peau et le cristallin en complément de la limite de dose corps entier. Jammet résume comme suit l'approche de la Commission « dans sa publication 26, la Commission a voulu exposer les critères d'acceptabilité des limites de dose, soit absolus pour les effets non stochastiques à seuil, soit relatifs pour les effets stochastiques, par comparaison avec les autres risques communément acceptés dans la vie professionnelle ou publique » (Jammet, 1978).

L'approche retenue par la CIPR dans la Publication 60 (ICRP, 1991) pour établir la limite de dose évolue. La Commission indique suivre une approche à la fois quantitative (en s'appuyant sur la quantification de multiples indicateurs de risque) et qualitative, en ayant recours au jugement d'expert et en introduisant la notion de tolérabilité du risque. Parmi les facteurs pris en compte pour définir la limite d'exposition, la Commission souligne l'importance entre autres de la réduction d'espérance de vie et l'objectif de prévention des effets déterministes. Dans la Publication 60 (ICRP, 1991), la CIPR n'évoque plus la comparaison des risques avec les industries jugées sûres comme élément de jugement.

Pour la gestion des effets stochastiques, la limite de dose marque une délimitation entre un niveau de risque jugé inacceptable et un niveau de risque jugé tolérable (Fig. 1). Le système de radioprotection vise à maintenir les expositions à un niveau jugé acceptable au regard des caractéristiques de la situation d'exposition, en s'appuyant sur le principe d'optimisation de la protection. Cette approche a été élaborée dans un rapport de la Royal Society britannique (Royal Society, 1983). Ce document constitue la base d'un guide du Health and Safety Executive (HSE) britannique portant sur la tolérabilité du risque associé aux centrales électronucléaires (HSE, 1988). Ce document du HSE propose un niveau maximum pour le risque tolérable pour les travailleurs de 10<sup>-3</sup> an<sup>-1</sup> (et 10<sup>-4</sup> an<sup>-1</sup> pour le public). Selon le HSE, une valeur de 10<sup>-6</sup> an<sup>-1</sup> correspond à un niveau de risque en deçà de laquelle les coûts engagés pour réduire plus avant le risque sont difficilement justifiables (le risque est alors jugé négligeable). La Commission ne propose pas dans ses recommandations de niveau de risque jugé négligeable.

La Publication 103 de la CIPR n'apporte aucun élément nouveau dans l'approche retenue pour établir la limite de dose (ICRP, 2007). En 2012, la Publication 118 propose une évolution significative et à la baisse des seuils de dose pour la cataracte (0,5 Gy au cristallin) et les maladies cardiovasculaires (0,5 Gy au cœur ou au cerveau). Cette publication conduit à une diminution de la limite de dose au cristallin pour prévenir le risque de

cataracte. L'objet de la limite de dose équivalente au cristallin semble ainsi rester, en premier lieu, de prévenir les effets déterministes (ici, la cataracte). Cependant, une exposition tout juste inférieure à 20 mGy au cristallin sur 40 années conduit à une dose au cristallin supérieure au nouveau seuil de dose proposé pour la cataracte. Le même constat peut être réalisé pour le cerveau ou le cœur et les maladies cardiovasculaires (seuil à 0,5 Gy).

Pour les situations d'exposition planifiées, lorsque la situation est justifiée et hors exposition médicale, la gestion pratique du risque radiologique s'appuie sur la mise en œuvre de 2 principes : le respect des limites de dose (propre à un individu) et l'optimisation de la protection (propre à une source). La limite de dose a, dans ce cadre, deux fonctions. Établie de manière adéquate, elle permet (en théorie) de prévenir les réactions tissulaires. Du point de vue de la CIPR, un individu qui reçoit une dose supérieure à la limite est exposé à un niveau de risque jugé inacceptable.

L'examen des publications passées de la Commission indique que la définition de la valeur de la limite de dose efficace et des limites de dose équivalente doit être considérée sous plusieurs angles :

- les connaissances scientifiques sur les effets des rayonnements ionisants sur la santé (réactions tissulaires et détriment) ;
- le jugement d'expert sur le caractère inacceptable d'un risque ;
- la prise en compte des valeurs éthiques du système de radioprotection, et de la prudence en particulier ;
- le retour d'expérience sur la mise en œuvre pratique du système de radioprotection ;
- la robustesse et la transparence des arguments qui étayent le choix des valeurs limites.

La CIPR a entamé un processus de révision de ses recommandations générales (Clement *et al.*, 2022 ; Bertho et Bourguignon, 2023). Il importe de prendre en compte ces différents aspects afin de juger du caractère adapté, ou non, des limites d'exposition actuellement en vigueur : sens de la limite au regard des objectifs de protection du système, approche retenue pour l'inférence du risque aux faibles doses et faibles débits de dose, réévaluation du détriment, prise en compte (ou non) des effets cardiovasculaires aux faibles doses, cas des effets héréditaires, établissement d'un niveau de risque inacceptable (ou juste tolérable), approches de prévention retenues pour l'exposition des travailleurs aux substances cancérogènes, mutagènes et reprotoxiques autres que les rayonnements ionisants (tout en tenant compte des spécificités du système de radioprotection), retour d'expérience sur la mise en œuvre du système de radioprotection, etc.

L'analyse des publications de la CIPR montrent que le choix de la valeur d'une limite de dose pour les situations d'exposition planifiée (hors expositions médicales) s'appuie sur des données scientifiques robustes, la consultation d'un large panel d'experts, scientifiques et professionnels de la radioprotection, le jugement d'expert et la connaissance du système de radioprotection et de son évolution. Les éléments présentés dans cet article visent à contribuer, en particulier, à ce dernier aspect.

## Remerciements

L'auteur tient à remercier Thierry Schneider pour sa relecture attentive du manuscrit.



## Financement

Ces travaux de recherche n'ont fait l'objet d'aucun financement spécifique.

## Conflits d'intérêts

L'auteur déclare l'absence de conflit d'intérêts.

## Déclaration de disponibilité des données

Les données de recherche sont incluses dans l'article.

## Références

- Bertho JM, Bourguignon M. 2023. La relation linéaire sans seuil (LNT) et l'évolution du système de radioprotection. The linear non threshold (LNT) relationship and the evolution of the radiological protection system. *Radioprotection* 58(4): 241–242. <https://doi.org/10.1051/radiopro/2023035>.
- Clement C, Rühm W, Harrison J, Applegate K, Cool D, Larsson CM, Cousins C, Lochard J, Bouffler S, Cho K, Kai M, Laurier D, Liu S, Romanov S. 2022. Maintenir les recommandations de la CIPR adaptées aux besoins. *Radioprotection* 57(2): 93–106. <https://doi.org/10.1051/radiopro/2022010>.
- Fuchs WC. 1896. Effect of Rontgen Rays on the Skin. *Western Electrician* 19: 291.
- HSE. 1988. Health and Safety Executive. The tolerability of risk from nuclear power stations. <https://www.onr.org.uk/documents/tolerability.pdf>.
- ICXPR. 1928. International Recommendations for X-Ray and Radium Protection on the proposal of the Radio-Physics Section, adopted by the Second International Congress of Radiology in Stockholm, July 27<sup>th</sup>, 1928. Stockholm 1929 : Kungl. Boktryckeriet. P. A. Norstedt & Soner.
- IXRPC. 1934. International recommendations for x-ray and radium protection. Revised by the International X-ray and Radium Protection Commission at the Fourth International Congress of Radiology, Zurich, July 1934. *Br. J. Radiol.* VII: 83.
- IXRPC. 1938. International recommendations for x-ray and radium protection. Revised by the International X-ray and Radium Protection Commission at the Fifth International Congress of Radiology, Chicago, September 1937. *Br. Inst. Radiol.* (leaflet): 1–6.

- ICRP. 1951. 1950 International recommendations on radiological protection. Revised by the International Commission on Radiological Protection at the Sixth International Congress of Radiology, London, 1950. *Br. J. Radiol.* 24: 46–53.
- ICRP. 1955. 1954 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *Brit. J. Radiol.* Supplement 6.
- ICRP. 1960. Report on decisions at the 1959 Meeting of the International Commission on Radiological Protection (ICRP). *Acta Radiol.* 53: 166–170.
- ICRP. 1966a. The Evaluation of Risks from Radiation. ICRP Publication 8. Oxford : Pergamon Press.
- ICRP. 1966b. Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 9. Oxford : Pergamon Press.
- ICRP. 1977. Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 26. *Ann. ICRP* 1(3).
- ICRP. 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. *Ann. ICRP* 21(1-3).
- ICRP. 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann. ICRP* 37(2-4).
- ICRP. 2012. ICRP Statement on Tissue Reactions/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).
- Jammet HP. 1978. Le système de limitation des doses (Publication CIPR 26). *Radioprotection* 13(4): 227–235. <https://doi.org/10.1051/radiopro/19781304227>.
- Laurier L, Billarand Y, Klovov D, Leuraud K. 2023. Fondements scientifiques de l'utilisation du modèle linéaire sans seuil (LNT) aux faibles doses et débits de dose en radioprotection. *Radioprotection* 58(4): 243–260. <https://doi.org/10.1051/radiopro/2023036>.
- Royal Society. 1983. The Assessment and Perception of Risk. Risk Assessment. A study group report. Proceedings of the Royal Society. Series A, Vol 376, N°1764.
- Sansare K, Khanna V, Karjodkar F. 2011. Early victims of X-rays: A tribute and current perception. *Dentomaxillof. Radiol.* 40: 123–125. <https://doi.org/10.1259/dmfr/73488299>.
- Steward CG. 1978. Les recommandations de la Commission internationale de protection radiologique, 1977. *Radioprotection* 13(4): 235–247. <https://doi.org/10.1051/radiopro/19781304235>.
- Sugier A, Nénot JC, Lecomte JF. 2005. Les recommandations de la CIPR : les raisons d'un changement. *Radioprotection* 40(3): 327–344. <https://doi.org/10.1051/radiopro:2005020>.

**Citation de l'article** : Vaillant L. 2024. Le principe de limitation des doses et la tolérabilité du risque radiologique. *Radioprotection* 59(3): 164–172



### Please help to maintain this journal in open access!

This journal is currently published in open access under the Subscribe to Open model (S2O). We are thankful to our subscribers and supporters for making it possible to publish this journal in open access in the current year, free of charge for authors and readers.

Check with your library that it subscribes to the journal, or consider making a personal donation to the S2O programme by contacting [subscribers@edpsciences.org](mailto:subscribers@edpsciences.org).

More information, including a list of supporters and financial transparency reports, is available at <https://edpsciences.org/en/subscribe-to-open-s2o>.