

PUBLICATION 126 DE LA CIPR
PROTECTION RADIOLOGIQUE CONTRE
L'EXPOSITION AU RADON

PUBLICATION 126 DE LA CIPR

Protection radiologique contre l'exposition au radon

Édition en langue française supervisée par
Jean-François Lecomte (IRSN), Géraldine Ielsch (IRSN),
Christophe Murith et Jean-Luc Godet

L'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) est un organisme public d'expertise et de recherche pour la sûreté nucléaire et la radioprotection. Il intervient comme expert en appui aux autorités publiques. Il exerce également des missions de service public qui lui sont confiées par la réglementation. Il contribue notamment à la surveillance radiologique du territoire national et des travailleurs, à la gestion des situations d'urgence et à l'information du public. Il met son expertise à la disposition de partenaires et de clients français ou étrangers.

Dans son activité d'édition, la collection « lignes directrices », dans laquelle s'insère le présent document, rassemble des guides et des ouvrages de recommandations. L'édition française de la CIPR 126 trouve naturellement sa place dans cette production, contribuant ainsi à aider nombre d'acteurs de la radioprotection dans leur pratique et leur réflexion.

ISBN : 978-2-490360-00-0

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© IRSN 2023

Dépôt légal : septembre 2023

Édition originale : *ICRP 2014. Radiological Protection against Radon Exposure ICRP Publication 126*. Ann. ICPR 43(3).

Table des matières

Éditorial invité	5
Préface	11
Résumé	13
Points principaux	19
Glossaire	21
1. Introduction	25
1.1. Contexte	25
1.2. Champ d'application	26
1.3. Structure	28
2. Caractéristiques de l'exposition au radon	29
2.1. Perspective historique	29
2.2. Sources et transfert du radon	30
2.3. Risques associés à l'exposition au radon	32
2.3.1. Preuves épidémiologiques	33
2.3.2. Approche dosimétrique	34
2.4. Défis liés à la gestion de l'exposition au radon	35
2.4.1. Considérations liées à la santé publique	36
2.4.2. Responsabilités des parties prenantes	37
3. Système de protection radiologique de la CIPR contre l'exposition au radon	39
3.1. Situations d'exposition et catégories d'exposition	40
3.1.1. Types de situations d'exposition	40
3.1.2. Catégories d'exposition	41
3.2. Justification des stratégies de protection	42
3.3. Optimisation de la protection	43
3.3.1. Niveau de référence	43
3.3.2. Niveau de référence opérationnel pour la concentration de radon	45
3.3.3. Processus d'optimisation	46
3.3.4. Niveau de référence opérationnel national	48
3.3.5. Approche graduée	49
3.4. Application de limites de dose	51
3.5. Résumé	51
4. Mise en œuvre des stratégies de protection	53
4.1. Plan national d'action	53
4.2. Prévention	55
4.2.1. Aménagement du territoire aux échelles locale et régionale	56
4.2.2. Codes et réglementations en matière de construction	56

4.3.	Actions de réduction	57
4.3.1.	Protocoles et techniques de mesure de la concentration du radon	57
4.3.2.	Méthodes de réduction de l'exposition au radon et leur applicabilité dans différentes situation	58
4.4.	Matériaux de construction	59
4.5.	Protection des travailleurs	59
4.6.	Protection des travailleurs contre l'exposition au radon dans l'industrie des mines d'uranium	60
4.7.	Interaction avec les parties prenantes	62
5.	Conclusions	63
6.	Références	65

Éditorial invité

Radon

Le gaz radioactif appelé radon (radon 222) est une source d'exposition très répandue. Il est aussi reconnu comme la deuxième cause de cancer du poumon, après le tabagisme. Il est présent dans tous les bâtiments et lieux souterrains mais les niveaux peuvent varier considérablement d'un endroit à un autre en fonction de facteurs tels que la géologie sous-jacente et le type de bâtiment. Pour de nombreuses personnes, y compris certains travailleurs, il s'agit du principal contributeur à l'exposition aux rayonnements.

Malgré son importance, la protection contre l'exposition au radon a mis du temps à figurer parmi les recommandations de la Commission. Il est possible que cela soit dû en partie au fait, qu'auparavant, l'accent était mis sur la protection contre les sources d'exposition essentiellement d'origine humaine, telles que l'énergie nucléaire et l'utilisation des rayonnements ionisants en médecine.

Un grand pas en avant a été franchi en 1991 avec la publication des Recommandations 1990 de la Commission (ICRP, 1991), qui ont attiré l'attention sur la nécessité de se protéger contre les sources naturelles de rayonnements ionisants dans les habitations et sur les lieux de travail. La Commission a poursuivi sur ce thème et publié ses recommandations en matière de protection contre le radon 222 dans les habitations et sur les lieux de travail dans la *Publication 65* (ICRP, 1993). Cette publication présentait certaines des stratégies clés pour la protection contre l'exposition au radon, notamment la délimitation de zones exposées au radon en vue d'y concentrer les moyens de protection et l'utilisation de critères, comme la mesure de la concentration du gaz radon, pouvant faciliter la prise de décisions quant à la nécessité de mettre en place des actions correctives. Des niveaux mesurés correspondant à des doses efficaces annuelles comprises entre 3 et 10 mSv ont été recommandés pour des actions dans les habitations. Toutefois, les stratégies de protection sur les lieux de travail et dans les habitations ont été évaluées séparément. Il est intéressant de noter que, même si le radon est une source d'exposition interne, la Commission n'a pas recommandé d'utiliser le modèle dosimétrique des voies respiratoires humaines pour évaluer et maîtriser l'exposition au radon. À la place, l'exposition au radon a été convertie en une dose efficace, en comparant directement le détriment associé par unité de dose efficace et par unité d'exposition (convention de conversion en dose).

En 2007, la Commission a publié de nouvelles recommandations relatives au système de protection radiologique (ICRP, 2007). À la différence des Recommandations

de 1990 (ICRP, 1991), celles-ci proposaient un système de protection qui s'applique à toutes les expositions aux rayonnements ionisants provenant de n'importe quelle source, quelles qu'en soient l'ampleur et l'origine. L'accent a été mis sur l'application du principe d'optimisation de la protection. Les Recommandations 2007 (ICRP, 2007) introduisaient une distinction entre les situations d'exposition aux rayonnements planifiées, d'urgence et existantes. La plupart des expositions au radon sont des situations d'exposition existantes car la source d'exposition est présente lorsqu'une décision doit être prise pour sa maîtrise. La protection est assurée grâce à l'utilisation de niveaux de référence et à l'application du principe d'optimisation.

En 2010, la *Publication 115* a mis à jour les estimations du risque de cancer du poumon associé à l'exposition au radon et à ses descendants (ICRP, 2010). Une importante conclusion en a été tirée : le coefficient de risque nominal ajusté au détriment pour l'exposition au radon devait être considéré comme environ deux fois supérieur à celui précédemment supposé. Ce rapport était accompagné de la Déclaration de la CIPR sur le radon qui incluait, entre autres, une révision des valeurs maximales des niveaux de référence du radon qui tenait compte des dernières conclusions sur le risque de cancer du poumon. Il annonçait également l'intention de la Commission de fournir des coefficients de dose de radon calculés à l'aide de ses modèles dosimétriques.

À peu près à la même époque, un Groupe de travail du Comité 4 a été créé pour élaborer les principes de protection 2007 spécifiquement applicables à la protection contre l'exposition au radon, en tenant compte du rapport sur le risque de cancer du poumon. Le rapport du Groupe de travail est publié dans ce numéro des Annales de la CIPR. Il représente une nouvelle étape dans l'évolution des recommandations de la CIPR en matière de protection contre l'exposition au radon. Le rapport décrit et clarifie l'application du système de 2007 pour la protection du public et des travailleurs contre les expositions au radon dans les habitations, sur les lieux de travail et dans d'autres types de lieux. S'appuyant sur les recommandations précédentes, le rapport préconise une approche intégrée de la protection contre l'exposition au radon dans tous les bâtiments, quels que soient leur usage et le statut de leurs occupants. La gestion de l'exposition au radon est essentiellement fondée sur le principe d'optimisation et l'utilisation d'un niveau de référence. En termes de dose efficace, une valeur pour le niveau de référence d'environ 10 mSv par an, cohérente avec les recommandations antérieures, continue d'être recommandée par la Commission. La gestion des expositions sur les lieux de travail présentant des niveaux élevés de radioactivité naturelle pose des problèmes particuliers. Ce rapport recommande d'adopter une approche graduée pour les lieux de travail, en utilisant, dans un premier temps, le même niveau de référence opérationnel que celui employé pour les autres bâtiments et lieux. Si malgré tous les efforts raisonnablement entrepris, les expositions restent supérieures aux niveaux de référence, les exigences appropriées du système de protection relatives à l'exposition professionnelle devraient être appliquées.

Ce rapport marque une avancée significative dans l'élaboration d'un système cohérent de protection, applicable à toutes les sources et situations, dans lequel le principe d'optimisation occupe une place centrale. La stratégie générale de protection présentée dans ce rapport pourrait, et même devrait, servir de modèle pour gérer d'autres circonstances d'exposition à des niveaux élevés de rayonnements d'origine naturelle.

La Commission poursuit ses travaux en vue de fournir un système complet de protection contre l'exposition au radon. En particulier, des coefficients de dose pour le radon, applicables à un certain nombre de situations différentes, seront publiés prochainement.

John R. Cooper
Ancien membre de la Commission principale de la CIPR

Références

ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21(1–3).

ICRP, 1993. Protection against radon-222 at home and at work. ICRP Publication 65. Ann. ICRP 23(2).

ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection [Recommandations 2007 de la Commission internationale de protection radiologique]. Publication 103 de la CIPR. Ann. de la CIPR 37(2–4).

ICRP, 2010. Lung cancer risk from radon and progeny and Statement on Radon. ICRP Publication 115. Ann. ICRP 40(1).

Protection radiologique contre l'exposition au radon

Publication 126 de la CIPR¹

Résumé

Dans ce rapport, la Commission émet des recommandations actualisées sur la protection radiologique contre l'exposition au radon. Le rapport a été élaboré en tenant compte des dernières recommandations de la CIPR concernant le système de protection radiologique, de toutes les connaissances scientifiques disponibles en matière de risques associés à l'exposition au radon et de l'expérience acquise par de nombreux pays et organisations quant à la maîtrise de cette exposition. Le rapport décrit les caractéristiques de l'exposition au radon, dont les sources et les mécanismes de transfert, les risques pour la santé qui y sont associés ainsi que les défis liés à la gestion de cette exposition. La Commission recommande d'adopter une approche intégrée pour la maîtrise de l'exposition au radon reposant autant que possible sur la gestion des bâtiments ou des lieux concernés par cette exposition, indépendamment de l'utilisation du bâtiment. Cette approche est fondée sur le principe d'optimisation et est graduée en fonction des responsabilités des principales parties prenantes, notamment sur les lieux de travail, et de l'intention des autorités nationales de maîtriser l'exposition au radon. Le rapport émet également des recommandations relatives à la gestion de l'exposition au radon lorsque des travailleurs sont considérés comme professionnellement exposés aux rayonnements et que les exigences appropriées de la Commission devraient être appliquées.

Mots-clés : exposition au radon, prévention, réduction, habitations, bâtiments, lieux de travail.

Auteurs pour le compte de la CIPR
J-F. Lecomte, S. Solomon, J. Takala, T. Jung, P. Strand, C. Murith,
S. Kiselev, W. Zhuo, F. Shannoun, A. Janssens

1. Approuvée par la Commission en avril 2014.

Préface

Lors de sa réunion à Porto, au Portugal, en novembre 2009, la Commission principale de la CIPR a approuvé la création d'un nouveau Groupe de travail sous la responsabilité du Comité 4, chargé d'élaborer des orientations en matière de protection radiologique contre l'exposition au radon.

Le mandat du Groupe de travail consistait à préparer une publication décrivant et clarifiant l'application des Recommandations 2007 de la Commission relatives à la protection contre l'exposition au radon dans les habitations, sur les lieux de travail et dans d'autres types de lieux. La publication devait présenter les caractéristiques de la situation d'exposition existante et examiner dans quels cas l'exposition au radon devait être considérée comme une situation d'exposition planifiée. La publication devait aussi émettre des orientations sur l'application des principes de protection radiologique, ainsi que sur les restrictions appropriées relatives aux doses individuelles et sur la méthode de gestion des risques associés à l'exposition au radon dans le cadre d'un plan national d'action.

La publication devait être élaborée à partir des recommandations précédentes de la CIPR, telles que la *Publication 65* (ICRP, 1993) sur la protection contre le radon 222 dans les habitations et les lieux de travail, la *Publication 101, partie 2* (ICRP, 2006b) sur l'optimisation de la protection radiologique, la *Publication 103* (ICRP, 2007) présentant les dernières recommandations générales de la CIPR et la *Publication 115* (ICRP, 2010) sur le risque de cancer du poumon associé à l'exposition au radon et à ses descendants, cette dernière incluant la Déclaration de la Commission sur le radon adoptée en novembre 2009. La publication devait également se fonder sur l'expérience acquise par de nombreux pays et organisations dans la maîtrise de l'exposition au radon.

La composition du Groupe de travail était la suivante :

J-F. Lecomte (président)	T. Jung	C. Murith
J. Takala	S. Solomon	S. Kiselev
P. Strand	W. Zhuo	

Les correspondants étaient :

R. Czarwinski (2009-2012)	A. Janssens	B. Long
S. Niu	F. Shannoun	T. Colgan (2012-2013)

Les lecteurs critiques du Comité 4 étaient :

J. Simmonds	W. Zeller	S. Liu
-------------	-----------	--------

Les relecteurs critiques de la Commission principale étaient :

J. Cooper (2009-2012)	A. Gonzalez (2009-2012)
J. Harrison (2013)	E. Vañó (2013)

En outre, Céline Bataille et Sylvain Andresz, agissant en tant que secrétaires du Groupe de travail, ont apporté une assistance scientifique fructueuse. De nombreux commentaires précieux ont également été fournis par André Poffijn, Ludovic Vaillant, un groupe miroir français et plusieurs experts de l'Agence de santé publique (Public Health England) du Royaume-Uni, ainsi que par le biais du processus de consultation de la CIPR. Le Groupe de travail souhaiterait remercier toutes ces personnes, de même que le Centre d'étude sur l'évaluation de la protection dans le domaine nucléaire (CEPN - France), pour les locaux mis à disposition et pour leur soutien durant ses réunions. Le Groupe de travail est également reconnaissant envers Michiya Sasaki, premier secrétaire scientifique adjoint de la CIPR, pour sa contribution.

Le Groupe de travail a procédé principalement par correspondance et s'est réuni à deux reprises, du 28 au 30 avril 2010 et du 19 au 21 septembre 2010 au CEPN, à Fontenay-aux-Roses, en France.

Les membres du Comité 4 durant la période de préparation de ce rapport étaient :

(2009-2013)

J. Lochard (président)	M. Kai	K. Mrabit
W. Weiss (vice-président)	H. Liu	S. Shinkarev
J-F. Lecomte (secrétaire)	S. Liu	J. Simmonds
P. Burns	S. Magnusson	A. Tsela
P. Carboneras	G. Massera	W. Zeller
D.A. Cool	A. McGarry	

(2013-2017)

D.A. Cool (président)	M. Doruff	A. Nisbet
J-F. Lecomte (secrétaire)	E. Gallego	D. Oughton
F. Bochud	T. Homma	T. Pather
M. Boyd	M. Kai	S. Shinkarev
A. Canoba	S. Liu	J. Takala
K-W. Cho	A. McGarry	

Résumé

(a) L'objectif de ce rapport est de décrire et clarifier l'application du système de la Commission pour la protection du public et des travailleurs contre les expositions au radon dans les habitations, sur les lieux de travail et dans d'autres types de lieux.

(b) Le radon a deux isotopes principaux. Le radon 222 est un descendant radioactif du radium 226 et est présent dans la croûte terrestre à des concentrations variables. Comme le radon est un gaz il peut circuler du sol vers l'intérieur des bâtiments. Cette propagation dépend de différents facteurs, tels que le type de sol, du bâtiment ou de la localisation. Le radon 220 est un descendant radioactif du radium 224 dans la chaîne de désintégration du thorium 232 également présent dans la croûte terrestre. Le radon 222 et le radon 220 peuvent également émaner de matériaux de construction et diffuser dans l'atmosphère intérieure. La concentration de radon dans l'air intérieur peut varier de plusieurs ordres de grandeur d'un bâtiment à un autre. Le présent rapport se concentre sur le radon 222.

(c) Le radon peut être inhalé. Dans la mesure où il est inerte, la quasi-totalité du gaz inhalé est ensuite exhalée. Toutefois, les descendants à vie courte du radon liés aux aérosols ambiants peuvent, une fois inhalés, se déposer dans les voies respiratoires. Selon les propriétés de diffusion de l'aérosol, les descendants présents dans l'air se déposent dans les cavités nasales, sur les parois des bronches et dans les poumons. Deux de ces descendants à vie courte, le polonium 218 et le polonium 214, émettent des particules alpha ; l'énergie déposée par ces dernières représente la principale contribution à l'exposition aux rayonnements ionisants pouvant entraîner des effets sur la santé.

(d) Dans la *Publication 115* (ICRP, 2010), la Commission a passé en revue et analysé des études épidémiologiques sur le lien entre le cancer du poumon et les expositions au radon. Dans le cas des mines souterraines et des habitations, il existe des preuves solides selon lesquelles l'exposition au radon et à ses descendants peut provoquer des cancers du poumon. Par conséquent, la Commission a recommandé, à des fins de protection radiologique, un coefficient de risque nominal ajusté au détriment pour le cancer du poumon chez une population adulte mixte de fumeurs et de non-fumeurs de 8×10^{-10} par Bq.h.m⁻³ pour l'exposition au gaz radon 222 en équilibre avec ses descendants [5×10^{-4} par WLM (*working level month* en anglais, que l'on peut traduire par niveau mensuel d'exposition professionnelle)]. Cette valeur équivaut approximativement au double de celle utilisée par la Commission dans la *Publication 65* (ICRP, 1993). Pour les tumeurs solides autres que le cancer du poumon et pour la leucémie, il n'existe à ce jour aucune données concordantes prouvant une incidence accrue associée à l'exposition au radon et à ses descendants.

(e) Dans le cadre du système de protection radiologique, l'exposition au radon présente les caractéristiques d'une situation d'exposition existante, car la source est constituée de concentrations non modifiées de l'activité primordiale d'origine naturelle omniprésente dans la croûte terrestre (ICRP, 2007). Les activités humaines, telles que la construction de bâtiments ou l'exploitation de mines, peuvent créer ou modifier des mécanismes qui augmentent l'exposition au radon et à ses descendants. Ces mécanismes de propagation du radon peuvent être maîtrisés par la mise en place d'actions de prévention et de réduction. Cependant, la source elle-même ne peut pas être modifiée et, par conséquent, existe déjà lorsqu'une décision doit être prise pour la maîtriser. Sur certains lieux de travail toutefois, la situation d'exposition au radon peut être considérée d'emblée par les autorités nationales comme une situation d'exposition planifiée. De tels lieux de travail incluent les mines d'uranium associées au cycle du combustible nucléaire.

(f) Il est peu probable que l'exposition au radon engendre une situation d'exposition d'urgence. Néanmoins, la mesure de concentrations localement très élevées pourrait nécessiter la mise en œuvre rapide de mesures de protection.

(g) Le postulat de la *Publication 103* (ICRP, 2007), comparé à celui de la *Publication 60* (ICRP, 1991), est de recommander une approche cohérente pour la gestion de tous les types de situations d'exposition. Cette approche s'appuie sur l'application du principe d'optimisation dont la mise en œuvre implique l'utilisation de restrictions pertinentes concernant les doses individuelles : contraintes de doses ou niveaux de référence. L'optimisation consiste à s'efforcer de réduire les doses à un niveau aussi bas que raisonnablement possible au-dessous de ces contraintes ou niveaux de référence, quel que soit le niveau d'exposition initial.

(h) La vie quotidienne, que ce soit à la maison ou au travail, entraîne inévitablement une certaine exposition au radon. À l'instar de nombreuses autres situations d'exposition existantes, les expositions au radon peuvent s'avérer très hétérogènes. Le niveau d'exposition dépend fortement du comportement individuel. Le rôle des mesures d'autoprotection est donc crucial. La caractérisation de la situation d'exposition est une condition préalable à sa maîtrise. La gestion de l'exposition domestique au radon devrait couvrir plusieurs aspects (environnement, santé, économie, architecture et éducation, par exemple) et impliquer un large éventail de parties prenantes.

(i) La maîtrise de l'exposition au radon dans les espaces intérieurs présente de nombreux défis. Dans la mesure où les individus se déplacent d'un endroit à un autre dans un même territoire, une stratégie de protection contre l'exposition au radon devrait être élaborée par les autorités nationales et mise en œuvre de façon cohérente et intégrée dans les différents lieux. Étant donné que l'essentiel de l'exposition au radon survient à l'intérieur des habitations, une stratégie de protection contre l'exposition au radon devrait aborder la question de l'exposition domestique dans une perspective de santé publique. Dans de nombreux bâtiments, le niveau de radon peut être bien supérieur à la concentration dont il a été démontré qu'elle représentait des risques potentiels pour la santé et il est alors nécessaire d'engager des actions de réduction de l'exposition globale de l'ensemble de la population ainsi que des expositions individuelles les plus élevées. La stratégie devrait être simple, adaptée aux autres risques sanitaires, soutenue et mise en œuvre à long terme et impliquer toutes les parties prenantes.

(j) La stratégie nationale de protection contre l'exposition au radon doit également aborder ces défis en termes de responsabilités, notamment celle du détenteur d'un logement envers les autres occupants, du constructeur ou du vendeur d'un bien immobilier envers l'acheteur, du propriétaire envers le locataire, de l'employeur envers l'employé et, de manière plus générale, du responsable de tout bâtiment envers ses occupants. Tous ces facteurs ont un impact sur la capacité de mise en œuvre de la stratégie de protection contre l'exposition au radon.

(k) La diversité des responsabilités renforce la nécessité d'une stratégie réaliste et efficace en matière de protection contre l'exposition au radon. Toute stratégie de protection contre l'exposition au radon devrait avoir pour but de maintenir ou de réduire les concentrations de radon à un niveau aussi bas que raisonnablement possible, tout en gardant à l'esprit qu'il n'est pas possible d'éliminer complètement le radon dans l'air intérieur.

(l) La Commission considère que, dans la plupart des situations, une stratégie nationale de protection contre l'exposition au radon est justifiée car le radon est omniprésent, qu'il constitue une source significative d'exposition aux rayonnements, qu'il représente la deuxième cause de cancer du poumon après le tabagisme et que, dans la plupart des cas, il peut être maîtrisé. Une stratégie de protection contre l'exposition au radon peut également avoir des retombées positives sur d'autres politiques de santé publique, telles que la lutte contre le tabagisme et l'amélioration de la qualité de l'air intérieur. La caractérisation de la situation, y compris l'évaluation des concentrations de radon et l'identification des zones exposées au radon, ainsi que la prise en compte des priorités en matière de santé publique et des facteurs socio-économiques, sont nécessaires pour que les autorités nationales formulent et mettent en œuvre une stratégie de protection contre l'exposition au radon. Bien que le risque absolu de cancer du poumon découlant de l'exposition au radon soit significativement plus élevé chez les fumeurs que chez les non-fumeurs, les recommandations de la Commission pour la protection contre l'exposition au radon sont identiques pour ces deux catégories de population.

(m) La caractérisation de la situation d'exposition est également une condition préalable à l'application du principe d'optimisation. Ce principe encourage la maîtrise de l'exposition au radon dans le but de maintenir ou de réduire l'exposition à un niveau aussi bas que raisonnablement possible, tout en tenant compte des circonstances économiques et sociétales qui prévalent. Comme pour la maîtrise des autres sources de rayonnements, la Commission recommande l'utilisation de restrictions des doses individuelles relatives à la source, en conjonction avec l'optimisation de la protection.

(n) Il incombe aux autorités nationales compétentes, comme pour les autres sources de rayonnements, d'établir leurs propres niveaux de référence nationaux en dose et le niveau de référence opérationnel en concentration, et d'appliquer dans leur pays le processus d'optimisation de la protection. L'objectif consiste à réduire à la fois le risque global pour l'ensemble de la population et, par souci d'équité, le risque individuel pour les personnes les plus exposées. Dans les deux cas, le processus est mis en œuvre à travers la gestion des bâtiments plutôt que par celle des expositions individuelles. Cette démarche devrait aboutir à des niveaux de concentration de radon dans l'air ambiant intérieur aussi faibles que raisonnablement possible en dessous du niveau de référence national.

(o) L'exposition au radon ne peut être maîtrisée qu'en agissant sur les voies d'exposition. Une telle approche est bénéfique pour les individus et un soutien leur est fourni afin de réduire les doses auxquelles ils sont exposés. Compte tenu de ces considérations, le niveau de référence approprié devrait correspondre à une dose annuelle comprise entre 1 et 20 mSv, comme le recommande la Commission pour les situations d'exposition existantes (ICRP, 2007, tableau 5). La Commission considère qu'une valeur de l'ordre de 10 mSv, comme indiqué dans la *Publication 65* (ICRP, 1993), devrait rester la valeur repère pour fixer un niveau de référence pour l'exposition au radon.

(p) Étant donné que la plupart des moyens mis en œuvre pour maîtriser l'exposition au radon sont appliqués aux bâtiments, il convient d'établir des niveaux de référence opérationnels pour le radon en termes de concentration dans l'air, laquelle est une quantité mesurable exprimée en becquerels par mètre cube (Bq.m^{-3}). Dans la *Publication 103* (ICRP, 2007), la Commission a recommandé, pour les niveaux de référence opérationnels, des valeurs maximales de 600 Bq.m^{-3} dans les habitations et de $1\,500 \text{ Bq.m}^{-3}$ sur les lieux de travail. Après l'examen de l'épidémiologie du radon dans sa *Publication 115* (ICRP, 2010) et l'augmentation du coefficient de risque nominal d'un facteur 2 environ, la Commission a réduit le niveau de référence maximal à 300 Bq.m^{-3} pour les habitations dans sa Déclaration sur le radon qui y est associée. Une concentration de radon de 300 Bq.m^{-3} dans les habitations correspond à une dose annuelle d'environ 10 mSv selon la convention de conversion en dose et sur la base du coefficient de risque nominal révisé (ICRP, 2010). La Déclaration sur le radon fait également référence à un niveau de $1\,000 \text{ Bq.m}^{-3}$ comme seuil pour l'application des exigences en matière de protection radiologique professionnelle, en remplacement de l'ancien niveau de référence maximal établi à $1\,500 \text{ Bq.m}^{-3}$.

(q) Dans sa Déclaration sur le radon, la Commission a également fait part de son intention de publier des coefficients de dose pour l'incorporation du radon et de ses descendants, calculés à l'aide de modèles biocinétiques et dosimétriques de référence. Sur la base des nouveaux coefficients de dose, une valeur de 300 Bq.m^{-3} équivaut à une dose annuelle dans les habitations plus élevée mais qui reste comprise dans l'intervalle de 1 à 20 mSv.

(r) Pour la mise en œuvre pratique d'une stratégie de protection contre l'exposition au radon, la Commission continue de recommander une valeur maximale du niveau de référence opérationnel de 300 Bq.m^{-3} pour le radon 222, dans les habitations. La Commission encourage vivement les autorités nationales à établir un niveau de référence opérationnel national qui soit aussi bas que raisonnablement possible dans un intervalle de 100 à 300 Bq.m^{-3} , en tenant compte des circonstances économiques et sociales qui prévalent. Cette démarche est conforme à la Déclaration de la CIPR sur le radon (ICRP, 2010) et au manuel de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) sur le radon dans l'air intérieur, intitulé *WHO Handbook on Indoor Radon* (WHO, 2009). Pour évaluer la conformité au niveau de référence opérationnel, les mesures de concentration du radon doivent être représentatives de la concentration moyenne annuelle dans un bâtiment ou un lieu donné.

(s) Par souci de simplification, considérant que les individus se déplaçant quotidiennement dans un même territoire devraient être protégés également partout où ils se rendent, la Commission recommande de fixer la même valeur maximale de 300 Bq.m^{-3} pour les bâtiments à vocation mixte qui sont utilisés aussi bien par des membres du public que par des travailleurs.

(t) La Commission recommande désormais d'adopter une approche graduée pour la maîtrise des expositions au radon. Dans le cadre d'une telle démarche, la stratégie de protection contre l'exposition au radon devrait commencer par un programme visant à encourager les décideurs politiques concernés à promouvoir des mesures d'autoprotection, telles que la mesure de la concentration du radon et, si nécessaire, la mise en place d'actions correctives. Ce processus peut être mis en œuvre par le biais d'informations, de recommandations, d'assistance et, si nécessaire, d'exigences plus formelles. Le recours à et le niveau de mise en œuvre de ces diverses actions devraient dépendre du degré de responsabilité juridique associé à la situation et de l'ambition de la stratégie nationale de protection contre l'exposition au radon.

(u) Une approche graduée spécifique devrait être mise en œuvre pour les lieux de travail, afin de remplacer le seuil de $1\ 000\ \text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ à partir duquel les exigences en matière de protection professionnelle s'appliquent. Dans les locaux où l'exposition des travailleurs au radon n'est pas considérée comme professionnelle (les espaces de bureaux par exemple), la première étape consiste à réduire la concentration de radon à un niveau aussi bas que raisonnablement possible, en dessous du même niveau de référence opérationnel que celui fixé pour les habitations. La dose annuelle correspondante y est en principe inférieure à celle dans les habitations car le temps passé sur le lieu de travail est généralement moindre que celui passé à domicile. Si la première étape présente des difficultés, une approche plus réaliste est recommandée dans un deuxième temps, consistant à optimiser la protection en utilisant les paramètres réels de la situation d'exposition, tels que le taux d'occupation du bâtiment ainsi qu'un niveau de référence de l'ordre de $10\ \text{mSv}$ pour la dose annuelle.

(v) Si malgré tous les efforts raisonnablement entrepris pour réduire l'exposition au radon sur les lieux de travail l'exposition reste supérieure au niveau de référence exprimé en dose, les travailleurs devraient être considérés comme professionnellement exposés. Dans ce cas, la Commission recommande d'appliquer les exigences adéquates en matière d'exposition professionnelle (ICRP, 2007, section 5.4.1).

(w) La Commission recommande également d'appliquer les mêmes exigences sur les lieux de travail où l'exposition des travailleurs au radon est considérée d'emblée comme professionnelle, par les autorités nationales. Ces lieux de travail peuvent inclure les stations thermales, les grottes et d'autres lieux de travail souterrains.

(x) Que les travailleurs soient ou non considérés comme professionnellement exposés, leur exposition devrait être maintenue en dessous de la valeur maximale de l'intervalle applicable aux situations d'exposition existantes soit $20\ \text{mSv}\cdot\text{an}^{-1}$. La limite de dose professionnelle devrait s'appliquer lorsque les autorités nationales estiment que la situation d'exposition au radon devrait être gérée comme une situation d'exposition planifiée.

(y) Pour être efficace, la stratégie nationale de protection contre l'exposition au radon devrait être élaborée dans une perspective de long terme. Le processus visant à réduire de manière significative les risques associés à l'exposition au radon pour l'ensemble de la population nécessite généralement plusieurs décennies d'efforts constants plutôt que quelques années. La Commission estime que, par souci de clarté, il convient de faire une distinction entre la prévention et la réduction, la première visant à maintenir l'exposition à un niveau aussi bas que raisonnablement possible

dans les circonstances qui prévalent, en particulier dans les nouveaux bâtiments, et la seconde visant à réduire l'exposition à un niveau aussi bas que raisonnablement possible dans les bâtiments existants.

(z) Par conséquent, une stratégie de protection contre l'exposition au radon devrait inclure le déploiement d'actions de prévention. Indépendamment du lieu, de la catégorie d'individus présents et du type de situation d'exposition, il est possible de considérer l'exposition au radon pendant les phases de planification, de conception et de construction d'un bâtiment. Des actions de prévention sont mises en œuvre par le biais de l'aménagement du territoire et des codes de construction qui s'appliquent aux nouveaux bâtiments et à la rénovation des bâtiments anciens. Cela implique aussi d'intégrer la stratégie de protection contre l'exposition au radon de manière cohérente avec les autres stratégies relatives aux bâtiments, comme celles sur la qualité de l'air intérieur ou sur les performances énergétiques, afin de développer des synergies et d'éviter les contradictions.

(aa) Le volet réduction de la stratégie nationale de protection contre l'exposition au radon concerne les bâtiments et les lieux existants. Dans ces cas, il conviendrait de veiller autant que possible à la maîtrise de l'exposition à travers la gestion du bâtiment ou du lieu concerné et de ses conditions d'utilisation, quelle que soit la catégorie d'individus présents. Les principales étapes consistent à réaliser des mesures de la concentration du radon et, si nécessaire, à procéder à la réduction des expositions qui y sont associées.

(bb) La stratégie nationale de protection contre l'exposition au radon devrait être mise en œuvre à travers un plan national d'action élaboré par les autorités nationales en impliquant les parties prenantes concernées. Ce plan devrait établir un cadre de travail avec une infrastructure claire, déterminer les priorités et les responsabilités et décrire les différentes étapes pour gérer la question de l'exposition au radon dans le pays. En fonction des conditions d'exposition, le plan devrait identifier les parties prenantes, telles que celles exposées et celles qui devraient apporter leur soutien ou mettre en œuvre des actions ; il devrait aborder les questions d'éthique, notamment celles associées aux responsabilités et devrait fournir des informations, des recommandations, de l'assistance ainsi que les conditions nécessaires pour une mise en œuvre pérenne.

(cc) Le plan national d'action devrait également traiter des protocoles et des techniques de mesure de la concentration du radon, des campagnes de mesure permettant d'identifier les zones exposées au radon, des méthodes de réduction de l'exposition au radon et de leur applicabilité dans différentes situations, des politiques de soutien incluant l'information, la formation et la participation des parties prenantes et l'évaluation de leur efficacité. La question des bâtiments ouverts au public et des lieux de travail devrait elle aussi être abordée dans le cadre d'une approche graduée spécifique reflétant les responsabilités juridiques. Le plan national d'action devrait être évalué et revu périodiquement, y compris la valeur du niveau de référence opérationnel.

Points principaux

- Les personnes sont exposées au radon à leur domicile, sur leur lieu de travail et dans les bâtiments à usage mixte. La variabilité des concentrations de radon dans l'air intérieur entraîne une répartition très hétérogène des expositions. L'exposition au radon à l'extérieur ne pose généralement pas de problème.
- Il existe des preuves solides selon lesquelles l'exposition au radon et à ses descendants peut provoquer des cancers du poumon. Cette exposition est la deuxième cause de cancer du poumon après le tabagisme.
- L'exposition au radon est une situation d'exposition existante, car la source est constituée de concentrations non modifiées de l'activité primordiale d'origine naturelle omniprésente dans la croûte terrestre. Seules les voies d'exposition peuvent être maîtrisées.
- Les autorités nationales devraient caractériser la situation d'exposition et élaborer une stratégie nationale de protection contre l'exposition au radon. Étant donné qu'une grande partie de cette exposition a lieu à domicile, cette stratégie devrait considérer l'exposition dans les habitations comme un enjeu de santé publique et viser à réduire l'exposition globale de la population générale ainsi que les expositions individuelles les plus élevées.
- La stratégie devrait être simple et réaliste, intégrée, afin d'être cohérente pour tous les bâtiments, graduée en fonction de la situation et des responsabilités et ne pas faire de distinction entre les fumeurs et les non-fumeurs. Elle devrait être envisagée en lien avec d'autres politiques de santé publique, telles que sur les performances énergétiques, la lutte antitabac et l'amélioration de la qualité de l'air intérieur.
- La stratégie de protection contre l'exposition au radon devrait inclure des actions de prévention pour les nouveaux bâtiments et des actions de réduction pour les bâtiments existants.
- La gestion de l'exposition au radon repose principalement sur l'application du principe d'optimisation et l'utilisation d'un niveau de référence approprié. Ce niveau devrait correspondre à une dose annuelle comprise entre 1 et 20 mSv, comme le recommande la Commission. La Commission considère qu'une dose annuelle de l'ordre de 10 mSv devrait rester la valeur repère servant à déterminer un niveau de référence pour l'exposition au radon.
- Pour la mise en œuvre pratique de la stratégie de protection contre l'exposition au radon, la valeur maximale du niveau de référence opérationnel recommandée par la Commission dans les habitations, représentative de la concentration moyenne

annuelle, reste de 300 Bq.m⁻³. La même valeur est recommandée pour tous les autres bâtiments et lieux de travail.

- La Commission encourage vivement les autorités nationales à établir un niveau de référence opérationnel national qui soit aussi bas que raisonnablement possible dans l'intervalle de 100 à 300 Bq.m⁻³, en tenant compte des circonstances économiques et sociétales qui prévalent.
- Dans la plupart des lieux de travail, les expositions des travailleurs au radon sont fortuites et ces derniers ne sont donc pas considérés comme professionnellement exposés. La Commission recommande une approche graduée spécifique sur les lieux de travail, qui respecte les étapes suivantes :
 - (i) optimiser la protection en utilisant le niveau de référence opérationnel commun pour tous les bâtiments et lieux de travail ;
 - (ii) optimiser la protection en utilisant les paramètres réels de la situation d'exposition, tels que le taux d'occupation du bâtiment et un niveau de référence de 10 mSv pour la dose annuelle ; et
 - (iii) appliquer les exigences pertinentes en matière d'exposition professionnelle si, malgré tous les efforts raisonnablement entrepris, l'exposition reste supérieure au niveau de référence.
- Les exigences pertinentes en matière d'exposition professionnelle s'appliquent aux lieux de travail où les travailleurs sont considérés d'emblée comme professionnellement exposés au radon par les autorités nationales.
- La limite de dose professionnelle devrait s'appliquer lorsque les autorités nationales estiment que la situation d'exposition au radon devrait être gérée comme une situation d'exposition planifiée.

Glossaire

Catégories d'exposition

La Commission distingue trois catégories d'exposition aux rayonnements : l'exposition médicale, l'exposition professionnelle et l'exposition du public.

Niveau de référence opérationnel

Valeur numérique exprimée sous la forme d'une quantité opérationnelle ou mesurable, correspondant au niveau de référence défini en termes de dose.

Employeur

Organisation, personne morale, partenariat, firme, association, trust, domaine, institution publique ou privée, groupe, entité politique ou administrative ou toute autre personne désignée conformément à la législation nationale, qui a une responsabilité, un engagement et des devoirs reconnus envers un travailleur lié à elle ou lui par une relation de travail mutuellement convenue. Un travailleur indépendant est considéré comme étant à la fois un employeur et un travailleur.

Concentration équivalente à l'équilibre

Concentration de l'activité du gaz radon, en équilibre avec ses descendants à vie courte, qui aurait la même concentration en énergie alpha potentielle que le mélange hors équilibre existant.

Facteur d'équilibre

Rapport entre la concentration équivalente à l'équilibre et la concentration du gaz radon. En d'autres termes, le rapport entre la concentration de l'énergie alpha potentielle pour le mélange réel de descendants du radon et celle qui s'appliquerait en équilibre radioactif.

Situation d'exposition existante

Situation causée par une source qui existe déjà lorsqu'une décision doit être prise quant à sa maîtrise ; il s'agit notamment des rayonnements d'origine naturelle, des zones contaminées à long terme après un accident nucléaire ou une situation d'urgence radiologique et des résidus issus de pratiques antérieures non conformes aux recommandations de la Commission.

Voie d'exposition

Chemin par lequel les rayonnements ou les radionucléides peuvent atteindre les êtres humains et les exposer.

Approche graduée

Pour un système de contrôle, tel qu'un système national ou un système de sûreté, il s'agit d'un processus ou d'une méthode selon lesquels la rigueur des mesures de contrôle et des conditions à appliquer est proportionnelle, dans la mesure du possible, à la probabilité et aux conséquences possibles d'une perte de contrôle, ainsi qu'au niveau de risque associé à cette perte.

Exposition médicale

Exposition encourue par les patients à des fins diagnostiques ou thérapeutiques dans le domaine médical ou dentaire par des personnes autres que celles exposées professionnellement, qui, en connaissance de cause, aident à soutenir et à reconforter des patients et par des volontaires participant à des projets de recherche biomédicale.

Membre du public

Toute personne soumise à une exposition qui n'est ni professionnelle ni médicale.

Enquête nationale sur le radon

Enquête menée afin de déterminer la distribution des concentrations de radon représentative de l'exposition au radon de la population d'un pays.

Matériau naturellement radioactif

Matériau radioactif ne contenant pas de quantités significatives de radionucléides autres que les radionucléides naturels. Les matériaux dans lesquels les concentrations des radionucléides naturels ont été modifiées par certains procédés sont inclus.

Exposition professionnelle

Toutes les expositions de travailleurs survenues sur le lieu de travail à la suite de situations qui peuvent raisonnablement être considérées comme relevant de la responsabilité de la direction opérationnelle.

Direction opérationnelle

Personne ou groupe de personnes qui dirige, contrôle et évalue une organisation au niveau le plus élevé. De nombreux termes différents sont utilisés, notamment président-directeur général, directeur général, directeur exécutif et groupe exécutif².

2. Note du traducteur : un autre terme couramment utilisé est : employeur.

Optimisation de la protection

Processus consistant à déterminer quel niveau de protection rend les expositions, ainsi que la probabilité et l'ampleur des expositions potentielles, aussi faibles que raisonnablement possible, en tenant compte des facteurs économiques et sociétaux.

Situation d'exposition planifiée

Situation qui implique l'introduction et l'exploitation délibérées de sources. Les situations d'exposition planifiées peuvent donner lieu à des expositions dont la survenue est anticipée (expositions normales) et à des expositions dont la survenue est incertaine (expositions potentielles).

Concentration d'énergie alpha potentielle

Concentration dans l'air des descendants à vie courte du radon 222 ou du radon 220, en termes d'énergie alpha émise durant la désintégration complète des descendants du radon 222 en plomb 210 ou des descendants du radon 220 en plomb 208, et de tout mélange de radon 222 ou de radon 220 à vie courte dans une unité de volume d'air. L'unité SI pour la concentration d'énergie alpha potentielle est le $J.m^{-3}$.

Exposition du public

Exposition aux sources de rayonnement encourue par des membres du public, autre que des expositions professionnelles et médicales.

Descendants du radon 220

Produits de désintégration du radon 220. Dans ce rapport, l'expression est utilisée dans un sens plus restreint désignant les produits de désintégration à vie courte, du polonium 216 au polonium 212 ou au thallium 208.

Descendants du radon 222

Produits de désintégration du radon 222. Dans ce rapport, l'expression est utilisée dans un sens plus restreint désignant les produits de désintégration à vie courte, du polonium 218 au polonium 214. Les descendants du radon sont parfois appelés « produits de désintégration du radon » ou plus classiquement « produits de filiation du radon ».

Zone exposée au radon

Zone géographique ou région administrative délimitée sur la base d'enquêtes indiquant une concentration de radon significativement plus élevée que dans d'autres parties du pays.

Niveau de référence

Dans les situations d'exposition existantes, il s'agit du niveau de dose ou de risque au-dessus duquel il est jugé inapproprié de permettre que des expositions se

produisent et en dessous duquel l'optimisation de la protection devrait être mise en œuvre. La valeur choisie comme niveau de référence dépendra des circonstances associées à l'exposition considérée.

Risque

Risque lié à la probabilité qu'un effet (un cancer du poumon par exemple) se produise. Les termes relatifs au risque sont regroupés ci-après.

- Risque relatif

Rapport entre le taux d'incidence ou le taux de mortalité pour la maladie considérée (c'est-à-dire le cancer du poumon) dans une population exposée et non exposée.

- Excès de risque relatif

Risque relatif - 1.

- Coefficient de risque

Augmentation du risque par unité d'exposition ou par unité de dose. En général, elle est exprimée en tant qu'excès de risque relatif par WLM, par J.h.m⁻³, par incrément de 100 Bq.m⁻³ ou par Sv.

- Détriment

Le détriment est un concept de la CIPR. Il reflète l'ensemble du préjudice sanitaire subi par un groupe exposé et par ses descendants du fait de l'exposition du groupe à une source de rayonnements. Le détriment est un concept multidimensionnel. Ses principales composantes sont des quantités stochastiques : la probabilité de cancer mortel attribuable, la probabilité pondérée de cancer non mortel attribuable, la probabilité pondérée d'effets héréditaires graves et la durée de vie perdue si le préjudice se produit.

Travailleur

Toute personne qui est employée à temps plein, à temps partiel ou temporairement par un employeur et à qui sont reconnus des droits et des devoirs en lien avec son emploi.

Niveau d'exposition professionnelle

Unité historique de la concentration d'énergie alpha potentielle. Ce niveau est défini comme toute combinaison de descendants à vie courte du radon dans 1 m³ d'air entraînant l'émission de $1,30 \times 10^8$ MeV.m⁻³ d'énergie alpha potentielle, soit approximativement $2,08 \times 10^5$ J.m⁻³.

Niveau mensuel d'exposition professionnelle (WLM)

Exposition cumulée due à l'inhalation d'une atmosphère à une concentration de 1 niveau d'exposition professionnel pendant un mois de travail de 170 h.

1

Introduction

1.1. Contexte

(1) La Commission a déjà publié des recommandations relatives à la protection contre l'exposition au radon. Dans la *Publication 65* (ICRP, 1993), la Commission a passé en revue les connaissances existantes sur les effets sur la santé dus à l'inhalation du radon et de ses descendants. Elle a également élaboré un cadre pour la gestion de l'exposition au radon dans les habitations comme sur les lieux de travail, conformément aux recommandations générales publiées deux ans auparavant (ICRP, 1991).

(2) Dans la *Publication 101, partie 2* (ICRP, 2006b), la Commission a mis à jour ses recommandations sur l'optimisation de la protection radiologique. Elle ne contenait pas de dispositions spécifiques à l'exposition au radon mais réaffirmait l'importance du principe d'optimisation pour la protection radiologique applicable dans toutes les situations d'exposition et recommandait d'élargir le processus afin d'impliquer les parties prenantes concernées. Dans le même temps, la Commission a révisé ses recommandations générales dans la *Publication 103* (ICRP, 2007), dans laquelle une section est consacrée à l'exposition au radon dans les habitations et sur les lieux de travail. Cette section a globalement confirmé les recommandations de la *Publication 65* (ICRP, 1993) et introduit le concept de niveau de référence, en remplacement du concept de niveau d'action.

(3) Plus récemment, la Commission a passé en revue les données scientifiques disponibles sur le risque associé à l'exposition au radon. En 2009, elle a adopté une déclaration résumant sa position actualisée sur l'exposition au radon à la maison et au travail, avec des valeurs du risque ajusté au détriment ainsi que des niveaux de référence révisés. La Déclaration de la CIPR sur le radon a été publiée avec la *Publication 115* qui examinait le risque de développer un cancer du poumon associé à l'exposition au radon et à ses descendants (ICRP, 2010).

(4) Depuis la *Publication 65* (ICRP, 1993), de nombreux pays ont acquis davantage d'expérience dans la mise en œuvre de politiques destinées à maîtriser l'exposition au radon. En outre, des organisations internationales ont fourni des informations scientifiques et des recommandations sur cette question. En particulier, le Comité scientifique des Nations unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR) a publié un rapport sur l'exposition au radon et ses risques (UNSCEAR, 2009), et l'Organisation mondiale de la santé (OMS) a publié un manuel traitant de la gestion de l'exposition au radon dans l'air intérieur du point de vue de la santé publique (WHO, 2009). Plus récemment, les recommandations clés de la Déclaration de la CIPR sur le radon ont été intégrées dans les normes de base internationales et européennes (IAEA, FAO, ILO, OECD/NEA, PAHO, UNEP, WHO, 2011, EURATOM, 2014).

(5) L'objet de ce rapport est de mettre à jour et de réviser les recommandations relatives à la maîtrise de l'exposition au radon en tenant compte des publications ci-dessus. Il considère également les coefficients de dose révisés pour l'inhalation et l'ingestion de radionucléides, y compris le radon et ses descendants, qui seront présentés en détail dans d'autres publications de la CIPR.

1.2. *Champ d'application*

(6) Le radon est un descendant radioactif de l'uranium 238, de l'uranium 235 et du thorium 232. Dans le cas de la chaîne de désintégration de l'uranium 238, l'isotope résultant est le radon 222, qui est un descendant direct du radium 226 (figure 1.1). Dans le cas de la chaîne de désintégration de l'uranium 235, l'isotope résultant est le radon 219 (figure 1.2). Dans le cas de la chaîne de désintégration du thorium 232, l'isotope résultant est le radon 220, un descendant direct du radium 224 (figure 1.3). L'exposition des êtres humains au radon provient principalement du radon 222, ou plus précisément de ses descendants à vie courte. En raison de sa courte demi-vie, l'exposition au radon 220 dans l'air ambiant intérieur est généralement moins significative. La contribution du radon 219 à l'exposition est insignifiante car, du fait de sa courte demi-vie, sa migration est minime et n'est donc pas prise en compte dans cette publication.

(7) Les personnes sont exposées au radon 222 et au radon 220 dans les habitations en tant que membres du public ou sur les lieux de travail en tant que travailleurs. Elles sont également exposées au radon dans les lieux publics ou privés ouverts au public, tels que les mairies, les bureaux de poste, les écoles, les hôpitaux, les maisons de retraite, les prisons, les commerces et les lieux de loisirs, soit en tant que membres du public (clients, utilisateurs, visiteurs, élèves, par exemple), soit en tant que travailleurs (membre du personnel, portiers, commerçants, guides, agents de sécurité, enseignants, infirmiers, par exemple). Dans certains cas, les travailleurs peuvent également habiter sur place (les concierges par exemple). Ce rapport est applicable à la maîtrise des expositions au radon 222 dans tous les lieux et pour tous les individus. Les recommandations concernant le radon 220, qui est moins préoccupant pour la santé, se concentrent principalement sur les dispositions relatives aux matériaux de construction (voir la section 4.4).

(8) L'objectif de ce rapport est de décrire et clarifier l'application du système de la Commission pour la protection contre l'exposition au radon. Il porte sur la gestion des bâtiments – tels que les habitations, les bâtiments à usage mixte et la

plupart des lieux de travail – pour la protection générale des membres du public et des travailleurs qui ne sont pas considérés comme professionnellement exposés aux rayonnements. Pour les lieux de travail particuliers, tels que les mines d'uranium, où les travailleurs sont généralement considérés comme professionnellement exposés aux rayonnements, aucune nouvelle disposition n'est recommandée pour la gestion des expositions individuelles.

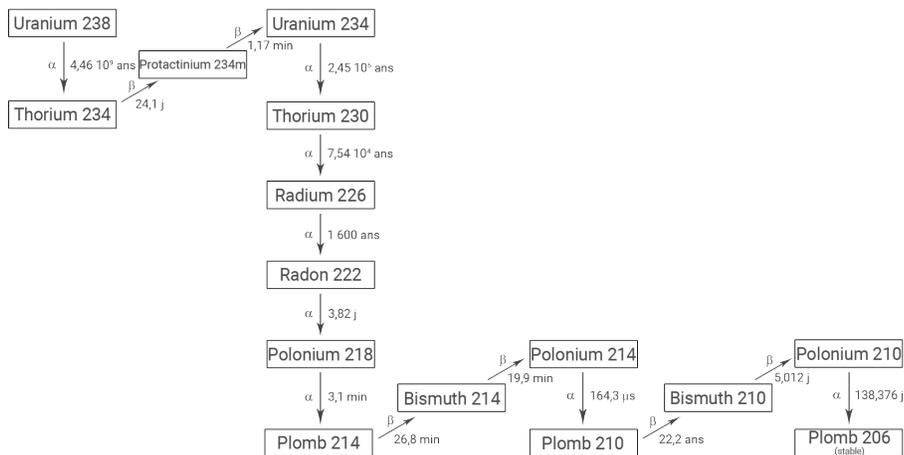


Figure 1.1. Descendants de l'uranium 235. * L'isotope est également un émetteur gamma significatif.

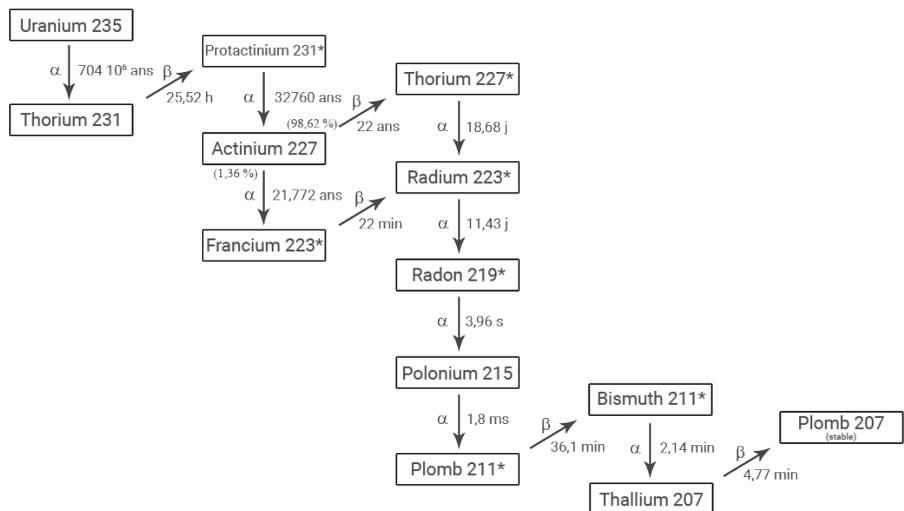


Figure 1.2. Descendants de l'uranium 235. * L'isotope est également un émetteur gamma significatif.

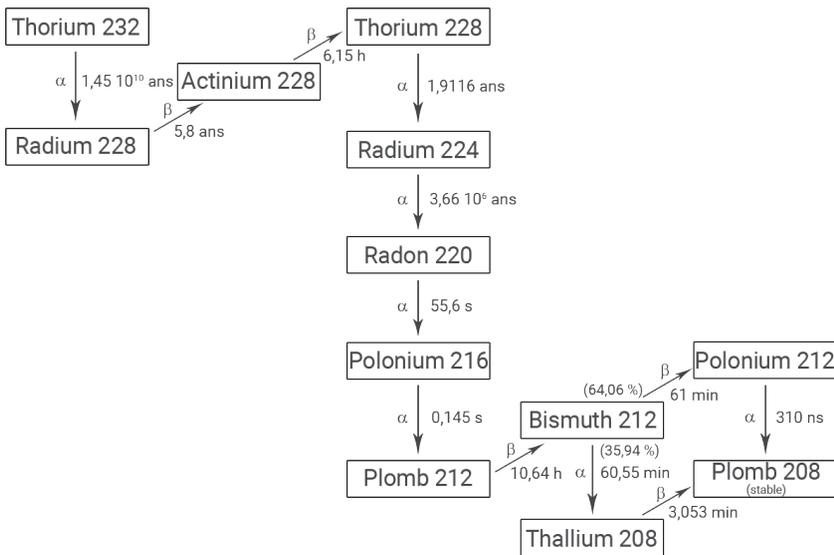


Figure 1.3. Descendants du thorium 232. * L'isotope est également un émetteur gamma significatif.

1.3. Structure

(9) La section 2 présente les caractéristiques de l'exposition au radon, et concerne principalement le radon 222. Elle fournit un bref historique de la maîtrise de l'exposition au radon 222 avec une description des sources et des mécanismes de transfert du radon, ainsi que la nature et la quantification des risques sanitaires associés. Elle explique également les principaux défis associés à l'élaboration d'une stratégie nationale de protection contre l'exposition au radon.

(10) La section 3 présente le système de protection contre l'exposition au radon. Après une explication sur la manière de gérer les catégories d'individus exposés dans différents types de situations d'exposition, trois parties sont consacrées à la justification des stratégies de protection, à l'optimisation de la protection et à l'application de limites de dose lorsque c'est approprié.

(11) La section 4 fournit des recommandations pour la mise en œuvre des stratégies de protection visant à maîtriser l'exposition au radon en fonction de la situation. La section 4.1 aborde la maîtrise de l'exposition dans les bâtiments au moyen d'un plan national d'action. Les sections 4.2 et 4.3 portent respectivement sur la prévention et les actions de réduction, et la section 4.4 couvre les matériaux de construction. Les sections 4.5 et 4.6 traitent de la protection des travailleurs contre l'exposition au radon sur les lieux de travail en général et dans les mines d'uranium, respectivement. Enfin, la section 4.7 est consacrée aux interactions avec les parties prenantes.

2

Caractéristiques de l'exposition au radon

2.1. *Perspective historique*

(12) L'existence d'un taux de mortalité élevé chez les mineurs d'Europe centrale a été reconnue avant le XVII^e siècle, et le cancer du poumon n'a été identifié, comme étant la principale cause de ces décès, qu'à la fin du XIX^e siècle (Haerting et Hesse, 1879). En 1924, il a été suggéré que ces cancers du poumon puissent être attribués à l'exposition au radon (Ludewig et Lorenzer, 1924).

(13) Ces premières observations ont incité à mesurer la concentration de radon. Les premières mesures ont été, pour la plupart, effectuées dans le cadre d'études environnementales sur divers phénomènes, tels que l'électricité atmosphérique, le transport atmosphérique et la libération de gaz par les sols. Des programmes de surveillance de l'exposition aux descendants du radon dans les mines d'uranium ont été développés dans les années 1950 en vue de contrôler l'exposition des travailleurs.

(14) Les premières mesures de la concentration de radon dans l'air intérieur ont été réalisées dans les années 1950 (Hultqvist, 1956) mais n'ont suscité que peu d'intérêt. À partir des années 1970, cependant, un nombre croissant de niveaux élevés de radon dans les habitations a été observé dans certains pays. Au cours des dix dernières années, de nombreux pays ont mené de vastes campagnes de mesures de la concentration de radon dans les habitations et sur les lieux de travail, et ont mis en place des stratégies de gestion.

(15) L'exposition au radon a été officiellement identifiée comme une cause de cancer du poumon en 1986 (WHO, 1986 ; IARC, 1988). À l'époque, les études épidémiologiques réalisées sur des populations de mineurs (ICRP, 1993) constituaient la principale source d'information sur les risques de cancer du poumon associé à l'exposition au radon.

(16) Depuis les années 1990, plusieurs études ont fourni des données concluantes sur les risques liés à de faibles niveaux d'exposition et ont montré l'existence de risques plus élevés lors d'expositions chroniques au radon à faible dose (par exemple Lubin et

al., 1997 ; NRC, 1998 ; EPA, 1999, 2003 ; Tomášek *et al.*, 2008). En outre, des analyses combinées récentes de données relatives au cancer du poumon tirées d'études cas-témoins sur l'exposition domestique au radon, ont démontré une augmentation du risque à de faibles niveaux d'exposition (Lubin *et al.*, 2004 ; Darby *et al.*, 2005, 2006 ; Krewski *et al.*, 2006).

(17) Une revue plus complète de l'histoire de la maîtrise de l'exposition au radon est présentée dans la *Publication 65* (ICRP, 1993).

2.2. Sources et transfert du radon

(18) Le radon 222 est un descendant radioactif de l'uranium 238 et est présent dans la croûte terrestre à des concentrations variables (de l'ordre de parties par millions). Le radon 222 a une demi-vie de 3,82 jours et est le descendant direct du radium 226.

(19) Lors d'une désintégration radioactive, les produits résultants sont généralement piégés dans la roche où l'atome se désintègre. Lorsque le produit de désintégration est gazeux, l'atome peut se déplacer. S'il est créé dans un espace poreux, à proximité d'une fracture ou d'une discontinuité dans la roche, il peut s'écarter de son point de production. L'air présent dans le sol est lourdement chargé en radon, avec des concentrations comprises entre 2 000 et 10^6 Bq.m⁻³, généralement mesurées entre 0,5 et 1 m sous la surface du sol (Cothorn et Smith, 1987 ; Winkler *et al.*, 2001). Le radon contenu dans les espaces poreux est essentiellement transporté par diffusion, la vitesse de transport dépendant de la porosité et de la perméabilité du sol, ou par convection, en fonction de la présence de fissures et de failles. Le transport du radon dissous dans les eaux souterraines constitue un autre mécanisme significatif de transfert.

(20) Le gaz radon peut s'échapper du sol et pénétrer dans l'atmosphère avant de se désintégrer. La quantité de radon émanant du sol est habituellement faible et se dilue rapidement dans l'air, l'ampleur de la dilution dépendant de la stabilité atmosphérique, de la présence de vents et de l'intensité des turbulences (laquelle est liée au gradient thermique vertical). Par conséquent, la concentration de radon 222 dans l'atmosphère est généralement faible mais variable. Les mesures réalisées au-dessus des terres varient entre 1 et 100 Bq.m⁻³. Les niveaux de concentration de radon 222 typiques en extérieur sont de l'ordre de 10 Bq.m⁻³, avec des niveaux plus faibles près des côtes et au-dessus des petites îles (UNSCEAR, 2000, 2009).

(21) Le radon 220 est un descendant radioactif du thorium 232 qui est présent dans la croûte terrestre à des concentrations variables. Le radon 220 a une demi-vie beaucoup plus courte ($T_{1/2} = 55$ s) que le radon 222 de sorte qu'il ne s'écarte pas significativement de sa source. Son comportement dans l'environnement est bien différent de celui du radon 222. Les matériaux de construction constituent la principale source de radon 220 dans l'air intérieur. Les concentrations de radon 220 varient considérablement d'un endroit à un autre. En général, les niveaux moyens de concentration de gaz radon 220 observés dans l'air intérieur, dans différents pays, sont compris entre 0,2 et 12 Bq.m⁻³ (UNSCEAR, 2000, 2009). Les expositions au radon 220 ne posent généralement pas de problèmes en termes de protection radiologique, sauf dans certains cas particuliers tels que dans certains habitats traditionnels.

(22) Si la concentration de radon émanant du sol se dilue rapidement dans l'air extérieur, ce n'est toutefois pas le cas lorsque le gaz pénètre dans des espaces clos, comme dans les habitations (figure 2.1). Suivant le taux de ventilation du bâtiment, le gaz radon peut s'accumuler à l'intérieur ce qui n'est pas le cas en plein air. En fonction des paramètres météorologiques et, en particulier, de la différence de température entre l'air extérieur et l'air intérieur, il existe une différence de pression entre le sol et les fondations du bâtiment. Cela entraîne une augmentation du flux d'air du sol chargé en radon, qui varie selon la perméabilité de la dalle à l'interface avec le sol et de la ventilation du vide sanitaire situé en dessous, s'il existe. Sous l'effet de la pression, ce flux est généralement beaucoup plus important que le transfert de radon par diffusion. En l'absence de différences de pression, le transfert du radon par diffusion est réduit en raison de la densité plus élevée des fondations comparée à celle de la surface du sol.

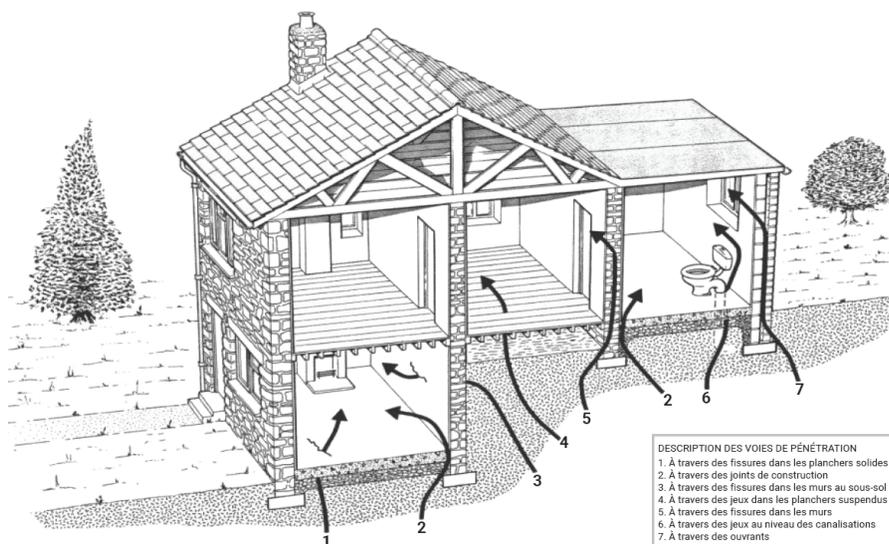


Figure 2.1. Voies de pénétration du radon à l'intérieur de l'habitat.

(23) Le transfert du radon du sol vers un bâtiment dépend de plusieurs paramètres.

- la composition du sol (chimie, géologie, humidité du sol et perméabilité au radon) ;
- la concentration de radon dans le sol ;
- la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment ou du lieu considéré, entre le sol et l'atmosphère entourant le bâtiment, et entre le sol et les pièces situées au bas du bâtiment ;
- la surface du bâtiment en contact avec le sol ; et
- l'étanchéité à l'air de l'enveloppe extérieure du bâtiment, laquelle est affectée par la présence de fissures, de canalisations, de gaines pour câbles, etc., notamment dans les planchers et les fondations du bâtiment.

(24) Le transfert de radon à l'intérieur d'un bâtiment dépend également de plusieurs facteurs :

- la circulation de l'air dans le bâtiment qui est fonction de la ventilation et de la climatisation ;
- les paramètres météorologiques et saisonniers, principalement la différence de température entre l'air extérieur et l'air intérieur ;
- l'étage et la taille des pièces ; et
- les choix liés au style de vie, comme le fait d'ouvrir les fenêtres et les portes, et les habitudes de travail des occupants du bâtiment.

(25) Les matériaux de construction contiennent des niveaux variables d'uranium et de thorium. Du radon peut être libéré dans l'air environnant à partir de ces matériaux. L'activité libérée dépend du taux de production de radon et de la porosité du matériau. Pour les matériaux de construction ordinaires, le débit volumétrique d'entrée est compris entre $0,05$ et $50 \text{ Bq} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ et la concentration correspondante est comprise entre $0,03$ et $30 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ (pour un débit moyen de renouvellement d'air de $0,7 \text{ h}^{-1}$). Dans certaines situations, la concentration de radon peut atteindre $1\,000 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ (si le béton contient une forte concentration de radium par exemple). Toutefois, dans la majorité des cas, cette source de radon a une importance secondaire comparée à l'infiltration de radon provenant du sol (EC, 1999).

(26) La concentration de radon dans les eaux souterraines varie considérablement et peut être relativement élevée malgré la faible solubilité du radon dans l'eau. Les valeurs vont de quelques $\text{Bq} \cdot \text{l}^{-1}$ à plusieurs dizaines de milliers de $\text{Bq} \cdot \text{l}^{-1}$ (Skeppström et Olofsson, 2007). Des concentrations de radon relativement élevées ont été observées dans certains puits privés et de forage et des sources. Si l'eau contenant du radon est utilisée pour approvisionner un foyer, un phénomène de dégazage du radon peut se produire dans l'air intérieur y entraînant des niveaux élevés. Les niveaux de concentration de radon dans la plupart des réseaux de distribution publics sont en général relativement faibles en raison de la diminution de la concentration du radon par désintégration ou par dégazage pendant le transfert.

(27) Quelle que soit la source de radon (sol, matériaux de construction ou eau), sa concentration dans les bâtiments peut varier de plusieurs ordres de grandeur, allant de 10 à $70\,000 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ selon l'UNSCEAR (2009). La valeur moyenne dans l'air intérieur à l'échelle mondiale est approximativement de $40 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$.

2.3. Risques associés à l'exposition au radon

(28) Traditionnellement, l'évaluation des risques associés à l'exposition au radon se fondait sur des études épidémiologiques, impliquant principalement le suivi de mineurs d'uranium. Cette approche a permis de calculer le risque relatif par niveau d'exposition, exprimé en WLM, en $\text{J} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$ ou en $\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$. Dans la *Publication 65* (ICRP, 1993), une convention de conversion en dose a été définie, en comparant directement le détriment par unité d'exposition au radon et à ses descendants avec le détriment

total par unité de dose efficace. Ces détriments ont été déterminés à partir d'études épidémiologiques réalisées respectivement sur des mineurs et sur des survivants des bombardements atomiques au Japon, qui ont été principalement exposés à des rayons gamma. Cette comparaison a permis de calculer la dose efficace par unité d'exposition, exprimée en mSv par WLM ou en mSv par Bq.h.m³, et de déterminer les niveaux d'action, exprimés en Bq.m³. Pour tous les autres radionucléides, la dose efficace est calculée en utilisant des modèles biocinétiques et dosimétriques, avec des facteurs de pondération radiologiques et tissulaires spécifiques. Dans la *Publication 115* (ICRP, 2010), la Commission a fait part de son intention d'inclure le radon aux autres radionucléides lors des futurs calculs des coefficients de dose.

2.3.1. Preuves épidémiologiques

(29) Dans son manuel sur le radon dans l'air intérieur (WHO, 2009), l'OMS a évalué les effets sur la santé de l'exposition au radon dans les habitations et a tiré les conclusions suivantes.

- Les études épidémiologiques confirment que l'exposition au radon dans les habitations augmente le risque de cancer du poumon dans la population générale. D'autres effets de l'exposition au radon sur la santé n'ont pas été démontrés de manière concluante.
- Il est estimé que l'exposition au radon est à l'origine de 3 à 14 % des cas de cancer pulmonaire, selon la concentration moyenne du gaz dans le pays et la méthode de calcul.
- Dans beaucoup de pays, l'exposition au radon est la deuxième cause de cancer du poumon après le tabagisme. L'exposition au radon est bien plus susceptible de provoquer des cancers du poumon chez les fumeurs et anciens fumeurs, que chez les personnes qui n'ont jamais fumé. Chez ces dernières, cependant, il représente la première cause de cancer du poumon.
- Il n'existe pas de seuil connu de concentration en dessous duquel l'exposition au radon ne présente aucun risque. Même de faibles concentrations de radon peuvent entraîner une légère augmentation du risque de cancer du poumon.

(30) Dans la *Publication 115* (ICRP, 2010) sur le risque de cancer du poumon associé à l'exposition au radon et à ses descendants, la Commission a passé en revue et analysé de manière approfondie l'épidémiologie du radon, tant pour les travailleurs (mineurs) que pour la population en général. Ses principales conclusions ont été les suivantes.

- Il existe des données concluantes, issues d'études sur des cohortes de mineurs et d'études cas-témoins sur les expositions résidentielles au radon, prouvant que l'exposition au radon et à ses descendants peut causer des cancers du poumon. Pour les tumeurs solides autres que le cancer du poumon et la leucémie, il n'existe à ce jour aucune preuve convaincante ou concordante d'un excès de risque associé à l'exposition au radon et à ses descendants.
- Des comparaisons appropriées des estimations du risque de cancer du poumon issues d'études sur des populations de mineurs et d'études résidentielles montrent une bonne cohérence. Trois méta-analyses d'études cas-témoins sur

l'exposition résidentielle (en Europe, en Amérique du Nord et en Asie) ont donné des résultats similaires. Après un ajustement lié aux incertitudes statistiques dans les mesures de l'activité volumique du radon, l'étude cas-témoins européenne sur l'exposition résidentielle a montré un excès de risque relatif de 16 % (intervalles de confiance à 95 % : 5 à 32 %) par 100 Bq.m⁻³ (Darby *et al.*, 2005). Cette valeur peut être considérée comme une estimation raisonnable à des fins de gestion du risque pour des expositions au radon relativement faibles et prolongées dans les habitations, étant donné que ce risque est lié à une période d'exposition d'au moins 25 ans.

- Le risque cumulé de développer un cancer du poumon avant l'âge de 75 ans est estimé, pour les personnes n'ayant jamais fumé, à 0,4 %, 0,5 % et 0,7 % pour des activités volumiques du radon de 0, 100 et 400 Bq.m⁻³, respectivement. Les risques cumulés de développer un cancer du poumon avant l'âge de 75 ans, pour les personnes ayant fumé toute leur vie, sont estimés à environ 10 %, 12 % et 16 % pour des activités volumiques du radon de 0, 100 et 400 Bq.m⁻³, respectivement (Darby *et al.*, 2005, 2006). Le tabagisme demeure la cause la plus importante de développer un cancer du poumon.
- Sur la base d'un examen des études épidémiologiques menées sur des populations de mineurs, y compris des études concernant des niveaux d'exposition relativement faibles, un coefficient de risque nominal ajusté au détriment de 5×10^{-4} par WLM (0,14 par J.h.m⁻³) a été adopté pour le détriment pulmonaire par unité d'exposition. Cette valeur a été déterminée à partir d'études récentes portant sur l'exposition à l'âge adulte. Elle est proche du double de la valeur calculée dans la *Publication 65* (ICRP, 1993).

(31) À l'issue de cet examen, la Commission a recommandé, dans sa Déclaration sur le radon, un coefficient de risque nominal ajusté au détriment pour une population de tous âges (population adulte mixte de fumeurs et de non-fumeurs) de 8×10^{-10} par Bq.h.m⁻³ pour l'exposition au gaz radon 222 en équilibre avec ses descendants (ICRP, 2010). Les conclusions de la Commission sont cohérentes avec d'autres estimations exhaustives, y compris celles présentées à l'Assemblée générale des Nations unies par l'UNSCEAR (2009).

2.3.2. Approche dosimétrique

(32) Les doses équivalentes et les doses efficaces résultant de l'inhalation de descendants du radon peuvent être calculées à l'aide des modèles de référence biocinétiques et dosimétriques de la CIPR, comprenant le modèle des voies respiratoires humaines (ICRP, 1993, 2014a), le modèle du tractus alimentaire humain (ICRP, 2006a) et les modèles biocinétiques systémiques pour le polonium, le plomb et le bismuth (ICRP, 2014b). Un modèle biocinétique systémique pour le gaz radon a été développé afin de pouvoir calculer les doses efficaces résultant de l'inhalation de gaz radon (ICRP, 2014b).

(33) Le radon 222 se désintègre pour former un atome de polonium 218 non gazeux. Cet atome se désintègre à son tour en d'autres radionucléides, comme illustré sur la figure 1.1. Les descendants à vie courte du radon (polonium 218, plomb 214 et bismuth 214) sont présents dans l'air sous la forme de radionucléides soit libres, soit liés à des aérosols, la fraction non liée dépendant des conditions locales. Ils peuvent être éliminés lorsqu'ils se déposent sur des surfaces ou par ventilation.

(34) Comme le radon est un gaz inerte, la quasi-totalité du gaz inhalé est ensuite expirée. Toutefois, une grande partie des descendants du radon inhalés se dépose dans les voies respiratoires. En raison de la courte demi-vie de ces descendants, la dose est délivrée aux tissus pulmonaires avant qu'ils soient éliminés soit par absorption dans le sang soit par transport de particules vers le tractus alimentaire. Deux de ces descendants à vie courte, le polonium 218 et le polonium 214, émettent des particules alpha dont l'énergie déposée représente la majorité de la dose aux poumons. En revanche, les doses reçues par les organes systémiques et la région du tractus gastro-intestinal sont faibles. Par conséquent, la dose équivalente aux poumons contribue à plus de 95 % de la dose efficace après inhalation des descendants du radon. La dose efficace associée à l'inhalation du gaz radon seul est généralement inférieure à 10 % de la dose due à l'inhalation des descendants du radon.

(35) Les doses dépendent principalement de la concentration des descendants du radon, de la durée de l'exposition, du débit respiratoire et des propriétés des aérosols, y compris la distribution granulométrique des aérosols actifs et la fraction des radionucléides non liés à des aérosols. Si l'exposition est caractérisée par des mesures de la concentration du gaz radon, la détermination d'une valeur pour le facteur d'équilibre (F) est nécessaire pour estimer la concentration des descendants du radon dans l'air. À des fins de protection radiologique, la plupart des paramètres dans les modèles dosimétriques, tel que le débit respiratoire par exemple, correspondent à des valeurs pour le « travailleur de référence » ou la « personne de référence ». Pour le modèle dosimétrique considéré par la Commission (ICRP, 2014b), deux situations d'exposition professionnelle ont été envisagées : une mine et un lieu de travail en intérieur générique. Les coefficients dosimétriques calculés pour ces deux situations ne font pas de distinction entre les fumeurs et les non-fumeurs. Cette approche est considérée comme appropriée à des fins de protection radiologique.

(36) Pour les habitations, le coefficient de dose calculé est de 13 mSv par WLM (Marsh et Bailey, 2013). Avec ce coefficient de dose et des paramètres d'exposition de $F = 0,4$ et une occupation de $7\,000\text{ h.an}^{-1}$, une concentration moyenne annuelle de radon de 300 Bq.m^{-3} correspond à une dose qui se situe dans la partie supérieure de l'intervalle des niveaux de référence définie entre 1 et 20 mSv pour les situations d'exposition existantes. À titre de comparaison, une concentration de radon de 300 Bq.m^{-3} dans les habitations correspond à une dose annuelle d'environ 10 mSv en utilisant la convention de conversion en dose fondée sur l'épidémiologie (voir paragraphe 27) et en appliquant le coefficient révisé de risque nominal présenté dans la *Publication 115* (ICRP, 2010) ainsi que dans la publication de Marsh *et al.* (2010). Un coefficient de dose de 11 mSv par WLM a été obtenu pour les expositions dans les mines en utilisant l'approche dosimétrique, soit pratiquement la même valeur que celle obtenue avec la convention de conversion en dose.

2.4. Défis liés à la gestion de l'exposition au radon

(37) La maîtrise de l'exposition au radon dans l'air intérieur présente de nombreux défis qui doivent être relevés à travers une stratégie nationale de protection contre l'exposition au radon, plus particulièrement en termes de santé publique et de responsabilités.

2.4.1. *Considérations liées à la santé publique*

(38) Les personnes sont exposées au radon en tant que membres du public dans les habitations ou en tant que travailleurs sur les lieux de travail. Elles sont également exposées au radon dans les bâtiments à usage mixte, en tant que membres du public ou en tant que travailleurs. Étant donné que les personnes se rendent dans de nombreux endroits au cours d'une journée ordinaire, une stratégie de protection contre l'exposition au radon devrait idéalement assurer la cohérence de la gestion du risque dans les différents lieux, dans une région donnée. Elle devrait également prévoir une approche intégrée, en dépit du fait que la durée d'occupation varie d'un lieu à un autre.

(39) Selon l'OMS, l'exposition au radon dans l'air intérieur présente un risque important pour la santé du public (WHO, 2009) en raison des taux de mortalité par cancer du poumon qui lui sont attribuables comparés à d'autres cancers. Les personnes passent une grande partie de leur temps à l'intérieur, principalement chez eux. Du point de vue de la santé publique, l'exposition domestique au radon étant la plus importante, une stratégie de protection contre l'exposition au radon doit principalement se concentrer sur l'exposition dans les habitations plutôt que dans les espaces publics et sur les lieux de travail, où les locaux font l'objet d'une gestion formelle et où la réglementation est plus appropriée.

(40) Bien qu'il n'y ait pas d'études épidémiologiques sur l'exposition domestique des enfants au radon, on estime généralement qu'ils sont plus sensibles aux rayonnements que les adultes. Toutefois, conformément à son approche intégrée et compte tenu du fait que le risque s'accumule tout au long de la vie, la Commission ne recommande pas l'utilisation d'indicateurs ni de consignes spécifiques pour les enfants. Néanmoins, la présence significative d'enfants dans un bâtiment devrait être un argument pour renforcer la sensibilisation et mettre en œuvre des actions de prévention et de réduction de façon prioritaire.

(41) Du point de vue de la santé publique, la réduction de l'exposition au radon constitue un objectif à long terme. La prévention de cette exposition est particulièrement importante dans les bâtiments neufs. La mise en œuvre de mesures préventives dans les bâtiments neufs et rénovés constitue une bonne solution partielle, dont le rapport coût-efficacité augmente avec l'expérience acquise et l'application des codes de construction (STUK, 2008). Cela permet également de sensibiliser les professionnels impliqués dans le secteur de la construction.

(42) Des mesures de réduction dans les bâtiments existants sont également souvent appropriées lorsque ces derniers présentent des concentrations élevées de radon. Dans de telles situations, il peut y avoir une source principale d'entrée du radon, et les niveaux de concentration de radon peuvent souvent être réduits d'un facteur supérieur à 10.

(43) Les expositions individuelles au radon sont très variables, et un risque de cancer du poumon est avéré sur le long terme à des niveaux de concentration moyens de radon inférieurs à 200 Bq.m³ (ICRP, 2010). Par conséquent, l'objectif devrait être de réduire à la fois le risque global pour la population et, par souci d'équité, les expositions individuelles les plus élevées, afin d'atteindre des niveaux aussi bas que raisonnablement possible. L'élimination totale de l'exposition au radon n'est toutefois pas réalisable.

(44) L'exposition au radon n'est pas la seule source de risque pour la population. La stratégie de protection contre l'exposition au radon devrait être correctement proportionnée en tenant compte des autres risques sanitaires et des priorités identifiées dans le pays. De plus, il conviendrait de comparer et d'intégrer la stratégie de protection contre l'exposition au radon avec d'autres politiques de santé publique, telles que la lutte antitabac et l'amélioration de la qualité de l'air intérieur, afin d'éviter les incohérences et d'accroître l'efficacité.

(45) Compte tenu de l'omniprésence de l'exposition au radon ainsi que de la multiplicité et de la diversité des situations et des décideurs, une stratégie de protection contre l'exposition au radon devrait être simple, réaliste et intégrée, et aborder la plupart des situations avec la même approche. Cette stratégie devrait être soutenue et mise en œuvre sur le long terme, voire de façon permanente, et impliquer toutes les parties prenantes concernées.

2.4.2. Responsabilités des parties prenantes

(46) La stratégie nationale de protection contre l'exposition au radon doit également relever de nombreux défis en termes de responsabilités, notamment celle du détenteur d'un logement envers les autres occupants, du constructeur ou du vendeur d'un bien immobilier envers l'acheteur, du propriétaire envers le locataire, de l'employeur envers l'employé et, d'une manière plus générale, du responsable de tout bâtiment envers ses occupants.

(47) L'exposition au radon étant principalement un problème domestique, le succès d'une stratégie de protection contre l'exposition au radon dépend largement des décisions prises par les individus pour réduire le risque, le cas échéant (autoprotection), dans leur propre foyer. Il convient de clairement sensibiliser l'ensemble de la population au risque associé à l'exposition au radon, en particulier dans les zones exposées, afin d'aider les individus à prendre leurs responsabilités. Il faut reconnaître qu'à l'heure actuelle, à l'exception de quelques pays qui ont mis en place des politiques en matière d'exposition au radon, cette sensibilisation est souvent insuffisante et devrait être améliorée. Ces améliorations peuvent être obtenues par l'élaboration de plans d'action qui décrivent les risques associés à l'exposition au radon et les mesures nécessaires pour y remédier. Une bonne infrastructure et un soutien pour assurer l'information, la mesure et les actions de réduction de l'exposition au radon sont des conditions préalables.

(48) Le degré d'exécution des actions à engager est étroitement lié au niveau de responsabilité juridique associé à la situation. Le propriétaire d'une maison peut avoir de telles responsabilités si la maison est louée ou vendue. Un employeur est légalement responsable de la santé et de la sécurité de ses employés. Un directeur d'école (ou l'autorité locale) peut être légalement responsable de la santé de ses élèves ainsi que de son personnel. D'autres bâtiments publics et lieux de travail peuvent faire l'objet de considérations similaires. Plus largement, les exigences liées à de telles responsabilités devraient être en adéquation avec la politique générale de santé publique d'un pays.

(49) La question de la responsabilité illustre clairement la nécessité d'une approche graduée lors de l'élaboration et de la mise en œuvre d'une stratégie de protection contre l'exposition au radon. Une telle approche graduée devrait être à la fois ambitieuse et réaliste.

3 Système de protection radiologique de la CIPR contre l'exposition au radon

(50) Le système de protection radiologique de la Commission est décrit dans la *Publication 103*³ (ICRP, 2007). Selon le paragraphe 44, il « s'applique à toutes les expositions aux rayonnements provenant de n'importe quelle source, quelles qu'en soient l'ampleur et l'origine ». En particulier, selon le paragraphe 45, les recommandations de la Commission couvrent les expositions aux sources tant d'origines naturelle qu'artificielle. Les recommandations ne peuvent s'appliquer dans leur intégralité qu'aux situations dans lesquelles la source ou les voies d'exposition peuvent être maîtrisées par des moyens raisonnables. Dans de telles situations, les sources sont qualifiées de « maîtrisables ».

(51) L'exposition au radon dans l'air intérieur est maîtrisable car les voies d'exposition peuvent être largement contrôlées ou influencées. À l'extérieur, les concentrations de radon au niveau du sol peuvent être élevées mais le gaz radon est normalement dilué par sa dispersion dans l'atmosphère ; les concentrations dans l'air ambiant sont donc généralement assez faibles – jusqu'à quelques dizaines de Bq.m³ (UNSCEAR, 2009) – à l'exception de certaines zones limitées où l'exhalation de radon est très élevée. Dès lors que ni la source ni les voies d'exposition ne sont raisonnablement maîtrisables, la Commission considère qu'il n'est pas raisonnablement possible de maîtriser l'exposition humaine au radon dans l'air extérieur, sauf lorsque les concentrations très élevées en plein air proviennent d'une source renforcée par les activités humaines.

3. Au moment de rédiger la présente publication, la Commission révisait le glossaire fourni dans la *Publication 103* en raison de certaines imperfections et incohérences par rapport au texte. La présente publication fait donc référence au texte de la *Publication 103* plutôt qu'à son glossaire.

3.1. Situations d'exposition et catégories d'exposition

3.1.1. Types de situations d'exposition

(52) Une situation d'exposition est le processus qui implique une source de rayonnement d'origine naturelle ou artificielle et le transfert de rayonnement par diverses voies conduisant à l'exposition des individus. Les recommandations de la *Publication 103* (ICRP, 2007) organisent la protection radiologique selon trois types de situations d'exposition : les situations d'exposition planifiées, les situations d'exposition d'urgence et les situations d'exposition existantes. Les situations d'exposition planifiées sont des situations résultant de l'introduction et de l'exploitation délibérées de sources. Les expositions peuvent être anticipées et pleinement maîtrisées. Les situations d'exposition d'urgence sont des situations résultant d'une perte de contrôle de la source qui nécessitent des actions urgentes afin d'éviter ou de réduire les conséquences indésirables. Elles incluent également les expositions résultant d'un acte de malveillance ou de toute autre situation imprévue. Les situations d'exposition existantes sont des situations dans lesquelles la source existe déjà lorsqu'une décision est prise pour maîtriser l'exposition associée. Elles comprennent les expositions provenant de sources naturelles de rayonnement, ainsi que celles résultant de pratiques, d'événements et d'accidents antérieurs. Dans une telle situation, la caractérisation du mode d'exposition constitue une condition préalable à sa maîtrise.

(53) Les situations d'exposition au radon présentent les caractéristiques des situations d'exposition existantes car leur source provient de concentrations non modifiées de l'activité d'origine naturelle omniprésente dans la croûte terrestre. Les activités humaines peuvent créer ou modifier des voies d'exposition et augmenter les concentrations de radon dans l'air intérieur par rapport aux niveaux de la radioactivité naturelle à l'extérieur. Ces voies peuvent être modifiées à l'aide d'actions de prévention et de réduction. La source elle-même ne peut toutefois pas être modifiée et existe déjà lorsqu'une décision de gestion doit être prise. La présence de radon dans les habitations et sur les lieux de travail est citée comme exemple de situation d'exposition existante dans la *Publication 103* (ICRP, 2007, § 284).

(54) L'exposition au radon dans les mines d'uranium est souvent gérée de la même façon qu'une situation d'exposition planifiée car les mines d'uranium font partie du cycle du combustible nucléaire, et aussi parce que les travailleurs sont professionnellement exposés à d'autres sources de rayonnements ionisants en plus du radon, comme le rayonnement gamma externe, et à l'inhalation ou à l'ingestion de poussières. Il appartient aux autorités nationales de décider quelles autres situations d'exposition au radon impliquant des travailleurs doivent être considérées d'emblée comme des situations d'exposition planifiées.

(55) L'exposition au radon est peu susceptible de donner lieu à une situation d'exposition d'urgence même si la détection de concentrations très élevées dans un local peut hâter la mise en œuvre d'actions de protection, en particulier si cela affecte d'autres occupants envers lesquels le décisionnaire, pour une propriété, a un devoir de diligence.

(56) La philosophie de la *Publication 103* (ICRP, 2007), comparée à celle de la *Publication 60* (ICRP, 1991), est de recommander une approche cohérente pour la gestion de tous les types de situations d'exposition. Cette approche est basée sur l'application du processus d'optimisation en dessous des restrictions de dose appropriées (c'est-à-dire des contraintes de doses ou des niveaux de référence).

3.1.2. Catégories d'exposition

(57) La Commission distingue trois catégories d'exposition : l'exposition médicale, l'exposition professionnelle et l'exposition du public.

(58) L'exposition professionnelle est l'exposition occasionnée par les rayonnements, aux travailleurs, dans le cadre de leur activité professionnelle. Toutefois, en raison de l'omniprésence des rayonnements, l'application stricte de cette définition signifierait que tous les travailleurs devraient faire l'objet d'un régime de protection radiologique. La Commission limite donc son utilisation de l'expression « expositions professionnelles » aux expositions aux rayonnements encourues sur le lieu de travail du fait de situations qui peuvent être raisonnablement considérées comme relevant de la responsabilité de la direction opérationnelle (ICRP, 2007, § 178). Dans la plupart des lieux de travail, les expositions au radon sont fortuites (c'est-à-dire qu'elles ne sont pas causées par ou associées à la nature du travail exécuté mais résultent simplement de la présence des travailleurs et d'autres individus dans les locaux de l'employeur).

(59) La *Publication 65* (ICRP, 1993, paragraphe 86) stipule que « les travailleurs qui ne sont pas considérés comme professionnellement exposés aux rayonnements sont généralement traités de la même façon que les membres du public ». Cette position est toujours valable car la santé et la sécurité des travailleurs restent sous la responsabilité de leur employeur. En d'autres termes, sur les lieux de travail où l'exposition au radon est fortuite, l'exposition au radon n'est pas gérée en maîtrisant les expositions individuelles mais en contrôlant le bâtiment ou le lieu de travail, afin d'assurer la protection globale de ses occupants.

(60) Dans les cas où l'exposition au radon est concomitante à une exposition dans une situation d'exposition planifiée (telle que dans une centrale nucléaire ou dans le service de radiologie d'un hôpital par exemple), la Commission recommande une approche pragmatique. Les expositions des travailleurs au radon ne devraient faire partie de leur exposition professionnelle globale que si cela est nécessaire dans le cadre de l'approche graduée spécifique aux lieux de travail, comme décrit dans la section 3.3.5.

(61) L'approche de la Commission en matière de gestion de l'exposition au radon est également directement liée au type de lieu. La *Publication 65* (ICRP, 1993) fait une distinction entre l'approche de la protection dans les habitations et celle de la protection sur les lieux de travail. Considérant qu'un individu donné se déplace généralement dans de nombreux endroits – habitations, lieux de travail et bâtiments à usage mixte – situés au sein d'un même territoire, la Commission recommande désormais une approche graduée et intégrée en matière de protection dans tous les bâtiments, fondée sur les exigences relatives à l'exposition du public. En outre, la Commission considère qu'il est approprié d'appliquer ses exigences relatives

à l'exposition professionnelle sur certains lieux de travail identifiés sur la base soit du niveau de référence, en tant que critère quantitatif, soit d'une liste d'activités ou d'installations, en tant que critère qualitatif (voir la section 3.3.5).

(62) En raison de cette nouvelle approche, la Commission n'utilise plus le terme « point d'entrée », introduit dans la *Publication 103* (ICRP, 2007, § 298), pour décrire la concentration au-dessus de laquelle les exigences en matière de protection professionnelle s'appliquent à l'exposition au radon sur les lieux de travail.

3.2. *Justification des stratégies de protection*

(63) Dans le système de protection de la CIPR, le principe de justification est l'un des deux principes fondamentaux qui sont liés à la source (ICRP, 2007, § 203). En application de ce principe, toute décision qui modifie la situation d'exposition aux rayonnements devrait faire plus de bien que de mal. Cela signifie que l'introduction d'une nouvelle source de rayonnements, la réduction de l'exposition existante ou celle du risque d'exposition potentielle doit produire un bénéfice individuel ou sociétal suffisant pour compenser le détriment qui en résulte.

(64) L'exposition au radon peut être maîtrisée principalement grâce à des actions qui modifient les voies d'exposition, plutôt que par une action directe sur la source. Dans ces circonstances, le principe de justification est appliqué pour décider de la mise en œuvre ou non d'une stratégie de protection contre l'exposition au radon. Une telle décision, qui présentera toujours certains inconvénients, devrait, pour être justifiée, avoir des effets plus positifs que négatifs (ICRP, 2007, § 207). La responsabilité d'évaluer s'il est justifié de mettre en place ces stratégies en vue de garantir un bénéfice global pour la société incombe aux gouvernements ou aux autorités nationales. La caractérisation de la situation, telles que l'évaluation des concentrations de radon et l'identification des zones exposées au radon par exemple, ainsi que la prise en compte des priorités en matière de santé publique et des facteurs socio-économiques sont nécessaires pour que les autorités nationales puissent déterminer si une stratégie de protection contre le radon est justifiée dans un pays.

(65) La Commission considère que de nombreux arguments légitiment largement la mise en œuvre de stratégies nationales de protection contre le radon. Ces arguments sont notamment les suivants :

- le radon est une source significative d'exposition aux rayonnements et représente la deuxième cause de cancer du poumon dans l'ensemble de la population, après le tabagisme ;
- l'exposition au radon peut être maîtrisée, dans la mesure où il existe des techniques applicables pour prévenir et réduire les concentrations élevées de radon dans l'air intérieur ; et
- une stratégie de protection contre l'exposition au radon peut avoir des conséquences positives sur d'autres politiques de santé publique, comme celles relatives à la lutte antitabac et à l'amélioration de la qualité de l'air l'intérieur. La

réduction de la concentration du radon contribue à atténuer les effets du tabac sur la santé.

(66) Bien que l'exposition au radon soit nettement plus susceptible de provoquer un cancer du poumon parmi les fumeurs et anciens fumeurs que parmi les personnes qui n'ont jamais fumé, les données suggèrent qu'elle représente la première cause de cancer du poumon chez les non-fumeurs (WHO, 2009). L'excès de risque relatif est comparable pour les fumeurs et les non-fumeurs. En pratique, il serait difficile de gérer différemment ou séparément la question de l'exposition au radon pour les fumeurs, les non-fumeurs, les fumeurs passifs et les anciens fumeurs. Il est possible par exemple d'interdire de fumer dans un bâtiment, mais en limiter l'accès à une personne en fonction de sa pratique tabagique serait problématique. Dans un contexte professionnel, la discrimination entre les fumeurs et les non-fumeurs causerait des problèmes éthiques et sociaux qui ne relèvent pas de la compétence de la Commission. Ainsi, les recommandations de la Commission pour la gestion de l'exposition au radon ne font pas de distinction entre les fumeurs et les non-fumeurs.

3.3. Optimisation de la protection

(67) L'optimisation de la protection est le second principe fondamental de la protection radiologique et est au cœur du système de protection. Comme le principe de justification, il est lié à la source et s'applique aux situations d'exposition planifiées, d'urgence et existantes. Selon le principe d'optimisation, la probabilité de subir des expositions, le nombre de personnes exposées et l'ampleur de leurs doses individuelles doivent être maintenus à un niveau aussi bas que raisonnablement possible, compte tenu des facteurs économiques et sociaux. Cela signifie que le niveau de protection devrait être le meilleur possible en fonction des circonstances et devrait maximiser les effets positifs par rapport aux effets négatifs. Afin d'éviter que cette procédure d'optimisation n'aboutisse à des résultats fortement inéquitables, des restrictions devraient être appliquées concernant les doses ou les risques pour les individus, associés à une source spécifique (contraintes de doses ou de risques et niveaux de référence) (ICRP, 2007, § 203 et 211).

(68) La mise en œuvre du principe d'optimisation de la protection est une démarche essentielle à la réussite d'un programme de protection radiologique. Elle doit être soigneusement organisée pour prendre en compte les caractéristiques appropriées de la situation d'exposition. En outre, elle devrait inclure l'implication des parties prenantes concernées en fonction de la situation d'exposition. La Commission considère ces deux éléments comme des composantes importantes du processus d'optimisation (ICRP, 2006b, § 23).

3.3.1. Niveau de référence

(69) Dans la *Publication 65* (ICRP, 1993), la Commission considérait que certaines actions de réduction de l'exposition au radon dans les habitations étaient presque toujours justifiées au-dessus d'une dose efficace annuelle chronique de 10 mSv. La Commission considérait également qu'il est logique d'adopter un niveau d'action pour les interventions sur les lieux de travail correspondant au même niveau de dose efficace que le niveau d'action défini pour les habitations. Étant donné que, pour les mesures correctives simples, une valeur légèrement inférieure pourrait être envisagée,

la Commission a recommandé d'utiliser un intervalle de 3 à 10 mSv environ comme base pour déterminer les niveaux d'action dans les habitations ou sur les lieux de travail. Un niveau d'action a été défini comme la concentration moyenne annuelle de radon à partir de laquelle une intervention est recommandée afin de réduire l'exposition dans une habitation ou sur un lieu de travail.

(70) Dans la *Publication 103* (ICRP, 2007), la Commission a abandonné le concept de niveau d'action et a introduit à la place celui de niveau de référence, en combinaison avec le principe d'optimisation. Le niveau de référence représente, dans les situations d'exposition d'urgence et existantes maîtrisables, le niveau en dessous duquel l'objectif est de réduire toutes les doses à un niveau aussi bas que raisonnablement possible, en tenant compte des facteurs économiques et sociétaux. Le niveau de référence est aussi le niveau au-dessus duquel il est jugé inapproprié de maintenir des expositions.

(71) L'utilisation du concept de niveau de référence, plutôt que celui de niveau d'action, a pour conséquence la mise en œuvre de mesures d'optimisation même lorsque le niveau de référence n'est pas dépassé. Il faut garder à l'esprit que les niveaux de référence ne représentent ni une démarcation entre une situation « sûre » et une situation « dangereuse », ni ne reflètent un changement qualitatif des risques associés pour la santé des individus.

(72) Selon la *Publication 103* (ICRP, 2007), la valeur choisie comme niveau de référence est fonction des circonstances qui prévalent dans la situation d'exposition examinée (ICRP, 2007, § 234). Afin de fournir des recommandations pour le choix de valeurs appropriées, la Commission a défini une échelle de doses (ICRP, 2007, tableau 5) reflétant le fait que, dans un continuum de risque (hypothèse de la linéarité sans seuil), le risque qu'un individu est prêt à accepter dépend des circonstances de l'exposition. Cette échelle est divisée en trois intervalles qui illustrent la nécessité plus ou moins forte d'une intervention, laquelle dépend des caractéristiques de la situation d'exposition : degré de maîtrise de la source, bénéfice individuel ou sociétal tiré de la situation et exigences en matière d'information, de formation et de surveillance médicale ou dosimétrique. En termes de valeurs, les trois intervalles pour les doses soit aiguës, soit annuelles, sont les suivants : < 1 mSv, de 1 à 20 mSv et de 20 à 100 mSv.

(73) Conformément à la *Publication 103* (ICRP, 2007), les niveaux de référence pour les situations d'exposition existantes devraient typiquement se situer dans l'intervalle de 1 à 20 mSv. Cela s'applique lorsque les individus tirent des bénéfices directs de la situation d'exposition et lorsque les expositions peuvent être maîtrisées à la source ou bien en agissant sur les voies d'exposition. Ainsi, des informations générales devraient être mises à disposition, dans la mesure du possible, pour permettre aux individus de réduire leurs doses. L'exposition au radon ne peut normalement pas être maîtrisée à la source (à quelques exceptions près) mais elle peut l'être par de nombreuses actions de prévention et de réduction, qui ne sont pas démesurément contraignantes. En général, les individus tirent un bénéfice direct évident de leur présence à l'intérieur d'un bâtiment. Ainsi, il existe un avantage à conserver l'usage d'un bâtiment plutôt que de déménager dans un autre, voire dans une autre région.

(74) Dans la *Publication 103* (ICRP, 2007), la Commission a retenu comme borne supérieure du niveau de référence individuel la valeur de 10 mSv en dose efficace qui avait été adoptée dans la *Publication 65* (ICRP, 1993). Cette valeur, qui se situe au milieu de l'intervalle de 1 à 20 mSv, est cohérente avec le raisonnement expliqué dans

la *Publication 103* (ICRP, 2007, tableau 5). Pour des raisons pratiques et à des fins de continuité, la Commission recommande toujours un niveau de référence de l'ordre de 10 mSv.an^{-1} . Elle recommande également l'utilisation d'un niveau de référence opérationnel, exprimé en termes de concentration de radon dans l'air intérieur (en Bq.m^{-3}), qui est une quantité mesurable.

3.3.2. Niveau de référence opérationnel pour la concentration de radon

(75) Dans sa Déclaration sur le radon (ICRP, 2010), la Commission a réduit le niveau de référence opérationnel pour la concentration de gaz radon dans les habitations de 600 Bq.m^{-3} [niveau publié dans les Recommandations 2007 (ICRP, 2007)] à 300 Bq.m^{-3} , sur la base de considérations épidémiologiques. La Commission continue de recommander une valeur maximale de 300 Bq.m^{-3} comme niveau de référence opérationnel dans les habitations. Bien qu'il n'y ait pas de dose annuelle unique associée à cette valeur de 300 Bq.m^{-3} , il est clair que la grande majorité des doses annuelles qui seraient occasionnées à ce niveau de concentration de radon sont comprises dans l'intervalle ($1 \text{ à } 20 \text{ mSv.an}^{-1}$) identifié par la Commission comme étant approprié pour ce type de situation d'exposition existante.

(76) Dans son manuel sur le radon dans l'air intérieur, l'OMS a indiqué qu'un niveau de référence national de 100 Bq.m^{-3} pour les habitations est justifié du point de vue de la santé publique mais a reconnu que ce niveau ne pouvait pas être appliqué dans de nombreux pays (WHO, 2009). La valeur de 300 Bq.m^{-3} est déjà stipulée dans des normes, telles que les normes de base internationales (IAEA, FAO, ILO, OECD/NEA, PAHO, UNEP, WHO, 2011) et européennes (EURATOM, 2014) qui ont été révisées récemment. Comme indiqué dans la *Publication 103* (ICRP, 2007, § 295), il est de la responsabilité des autorités nationales compétentes, comme pour toute autre source de rayonnement maîtrisable, d'établir leurs propres niveaux de référence opérationnels, en tenant compte des circonstances économiques et sociétales qui prévalent, et d'appliquer le processus d'optimisation de la protection dans leur pays. La Commission encourage vivement ces autorités à établir un niveau de référence opérationnel national qui soit aussi bas que raisonnablement possible dans l'intervalle de $100 \text{ à } 300 \text{ Bq.m}^{-3}$. Il est important de noter que les niveaux de référence opérationnels se rapportent à la concentration moyenne annuelle de radon dans un bâtiment ou un lieu. En outre, bien que le risque absolu de cancer du poumon dû à l'exposition au radon soit significativement plus élevé chez les fumeurs que chez les non-fumeurs, les recommandations de la Commission en matière de protection contre l'exposition au radon ne font pas de distinction entre ces deux groupes.

(77) Comme les individus se déplacent d'un endroit à un autre dans un même territoire, une stratégie de protection contre l'exposition au radon devrait être élaborée par les autorités nationales et mise en œuvre de façon cohérente et intégrée dans les lieux concernés. Par conséquent, la Commission recommande, *a priori*, d'utiliser le même niveau de référence opérationnel dans les habitations et dans les bâtiments à usage mixte (écoles, hôpitaux, boutiques et cinémas, par exemple) qui sont accessibles à la fois aux membres du public et aux travailleurs et, par extension, sur les lieux de travail non accessibles au public où l'exposition au radon n'est pas considérée comme professionnelle (par exemple les espaces de bureaux ou les ateliers en général).

3.3.3. Processus d'optimisation

(78) Selon la *Publication 101, partie 2* (ICRP, 2006b, § 22), « pour assurer la meilleure protection possible dans les circonstances qui prévalent (dans des situations normales, d'urgence ou existantes maîtrisables), le processus d'optimisation en dessous d'une restriction de dose doit être mis en œuvre par le biais d'un processus continu et cyclique (appelé processus d'optimisation) qui comprend : l'évaluation de la situation d'exposition pour identifier le besoin d'action (cadrage du processus), l'identification des options de protection envisageables pour maintenir l'exposition à un niveau aussi bas que raisonnablement possible, la sélection de la meilleure option adaptée aux circonstances, la mise en œuvre de l'option choisie par le biais d'un programme d'optimisation efficace et l'examen régulier de la situation d'exposition pour évaluer si les circonstances nécessitent la mise en place d'actions de protection correctives ».

(79) S'agissant de l'optimisation, la Commission estime qu'il convient de faire une distinction entre la prévention, qui vise à maintenir l'exposition attendue à un niveau aussi bas que raisonnablement possible en fonction des circonstances, et la réduction, qui vise à réduire la dose résiduelle à un niveau aussi bas que raisonnablement possible (voir la figure 3.1). Pour l'exposition au radon, la prévention se concentre sur l'application des codes de construction afin d'éviter des concentrations élevées de radon dans l'air intérieur des bâtiments neufs, tandis que la réduction vise à réduire les concentrations élevées de radon dans les bâtiments existants à l'aide de techniques telles que la ventilation contrôlée.

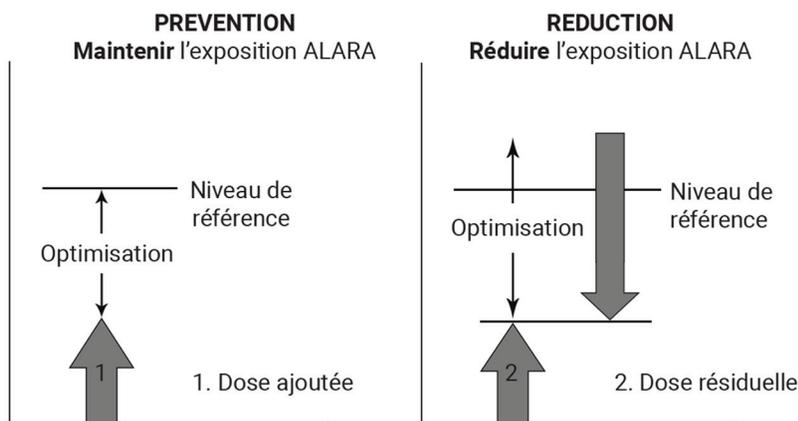


Figure 3.1. Mise en œuvre du principe d'optimisation. ALARA est l'acronyme de *as low as reasonably achievable*, qui signifie « aussi bas que raisonnablement possible », en tenant compte des circonstances économiques et sociétales.

(80) L'objectif du processus d'optimisation est de réduire à la fois le risque global pour l'ensemble de la population et, par souci d'équité, le risque individuel pour les individus les plus exposés, c'est-à-dire ceux qui se situent dans la partie supérieure de la distribution des expositions individuelles (voir la figure 3.2). Dans les deux cas, le processus inclut la gestion des bâtiments ou des lieux et doit aboutir à des

concentrations de radon dans l'air ambiant aussi faibles que raisonnablement possible en dessous du niveau de référence opérationnel national. Dans un bâtiment donné, après la mise en œuvre réussie d'actions de gestion, les seules exigences à plus long terme seraient d'inspecter et d'entretenir le système de réduction et de procéder à une surveillance périodique pour s'assurer que les niveaux de concentration de radon restent faibles.

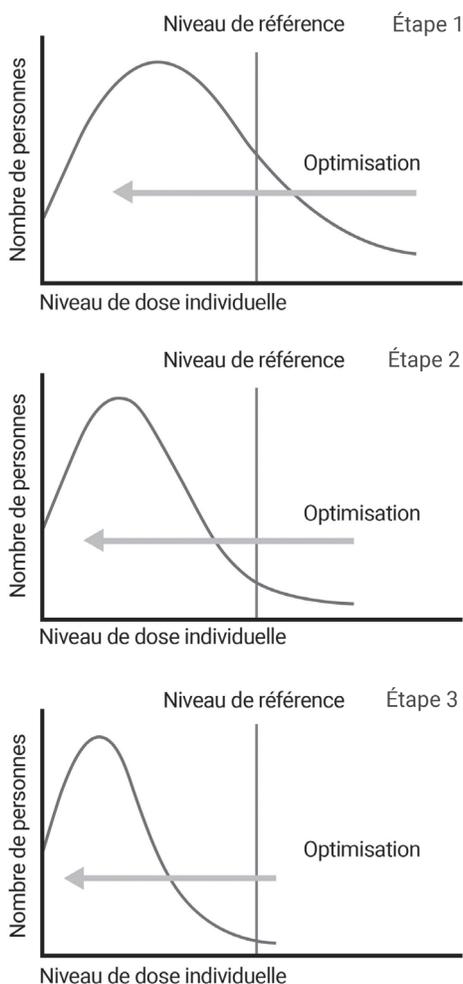


Figure 3.2. Utilisation d'un niveau de référence dans une situation d'exposition existante et évolution dans le temps de la distribution des expositions individuelles résultant du processus d'optimisation.

(81) L'objectif consistant à réduire de manière significative les risques associés à l'exposition au radon pour l'ensemble de la population s'inscrit dans une perspective sur plusieurs décennies plutôt que sur quelques années.

(82) L'optimisation de la protection contre les expositions au radon dans les bâtiments et les lieux concernés peut être déterminée à l'aide de techniques d'optimisation standards, y compris des analyses coûts-bénéfices et des techniques multi-attributs. Tous les attributs pertinents – techniques, économiques, sociétaux et éthiques – doivent être pris en compte, avec une attention singulière portée à la question de l'équité, en particulier pour les expositions chroniques à des niveaux très élevés. Ainsi, il est possible de faire des comparaisons entre les coûts financiers associés au nombre estimé de cas de cancer du poumon susceptibles d'être attribués à différents niveaux d'exposition au radon, les diverses actions de prévention et de protection mises en œuvre pour une population donnée et les coûts de ces actions visant à réduire les expositions au radon (HPA, 2009 ; WHO, 2009). De telles analyses peuvent être utilisées pour prendre des décisions éclairées quant au rapport coût-efficacité des mesures visant à réduire les niveaux de concentration de radon dans les propriétés existantes et les bâtiments neufs.

3.3.4. Niveau de référence opérationnel national

(83) Comme indiqué précédemment, il incombe aux autorités nationales compétentes, comme pour toute autre source maîtrisable de rayonnements, d'établir leurs propres niveaux de référence opérationnels nationaux en termes de concentration de radon dans l'air intérieur (en Bq.m⁻³), en tenant compte des circonstances économiques et sociétales, et d'appliquer le processus d'optimisation de la protection dans leur pays. Comme stipulé à la section 3.3.2, la Commission encourage vivement ces autorités à définir un niveau de référence opérationnel national qui soit aussi bas que raisonnablement possible compris dans l'intervalle de 100 à 300 Bq.m⁻³.

(84) La première étape consiste à caractériser la situation d'exposition des individus et de l'ensemble de la population dans le pays, ainsi qu'à déterminer les autres critères économiques et sociétaux pertinents et la possibilité de réduire ou de prévenir l'exposition. La valeur appropriée pour le niveau de référence opérationnel peut ensuite être établie grâce à un processus d'optimisation générique qui tient compte des préférences et des spécificités nationales ou régionales, ainsi que, le cas échéant, des directives internationales et des bonnes pratiques en vigueur. De nombreux facteurs, tels que la concentration moyenne et la distribution du radon, le nombre d'habitations existantes présentant des niveaux élevés de concentration de radon, etc., devraient être pris en considération.

(85) Une fois le niveau de référence opérationnel national établi, des actions de prévention et de réduction devraient être prises, selon les besoins, pour contribuer à réduire de manière substantielle les expositions au radon. Il ne suffit pas d'adopter des mesures d'amélioration marginales visant à réduire les concentrations de radon à une valeur juste au-dessous du niveau de référence opérationnel national. Ce niveau devrait également être appliqué au stade de la conception de tout nouveau bâtiment, quelle que soit sa vocation.

(86) La valeur du niveau national de référence opérationnel pour l'exposition au radon devrait être réexaminée périodiquement afin de s'assurer qu'elle reste appropriée.

3.3.5. *Approche graduée*

(87) La Commission recommande désormais d'adopter une approche graduée pour maîtriser les expositions au radon. Dans le cadre d'une telle approche, la stratégie de protection contre l'exposition au radon devrait commencer par un programme visant à encourager les décideurs politiques concernés à promouvoir des actions d'autoprotection, telles que la mesure de la concentration du radon et, si nécessaire, sa réduction. Ce processus peut être mis en œuvre par le biais d'informations, de recommandations, de mesures d'incitation, d'une assistance pratique et, si nécessaire, d'exigences plus formelles. Le niveau de mise en œuvre de ces diverses actions devrait dépendre du degré de responsabilité juridique associé à la situation et de l'ambition de la stratégie nationale de protection contre l'exposition au radon.

(88) La stratégie de protection contre l'exposition au radon devrait inclure un programme d'action prévoyant notamment la mise à disposition d'informations générales sur le comportement du radon et les risques associés à son exposition, des campagnes visant à sensibiliser le public ciblé, des campagnes de mesures des concentrations du radon et l'organisation d'un soutien technique ou financier pour la réalisation des mesures et des actions de réduction (voir la section 4). Ces actions pourraient être mises en œuvre en priorité dans certains territoires, comme ceux exposés au radon, et dans les bâtiments où les taux d'occupation sont élevés. Il peut s'agir de bâtiments occupés par un grand nombre de personnes ou bien de bâtiments dans lesquels les occupants, souvent des résidents, séjournent de façon prolongée.

(89) Dans les situations impliquant des responsabilités juridiques (employeur/employé, propriétaire/locataire, constructeur/acheteur, vendeur/acheteur, bâtiment public à taux élevé d'occupation), certaines obligations peuvent être requises. Des dispositions obligatoires proportionnées au degré et au type de responsabilité peuvent être plus appropriées que des mesures incitatives si une évaluation indique qu'elles seraient plus efficaces au regard des circonstances. De telles dispositions pourraient viser à garantir une bonne traçabilité, la conservation des données et le respect du niveau de référence opérationnel.

(90) Une stratégie de protection contre l'exposition au radon devrait garantir que les exigences soient proportionnées aux moyens mis à la disposition des organisations et des personnes responsables et à ce que les avantages en termes de réduction du risque l'emportent sur les inconvénients. Par exemple, les exigences ne devraient ni dissuader les personnes d'effectuer des mesures initiales de la concentration du radon, ni entraîner une baisse de la valeur d'une propriété, ni engager des procédures trop lourdes. Lorsqu'un bâtiment présente des concentrations élevées de radon, la réponse devrait inclure l'implication et la communication avec les parties prenantes concernées, telles que les usagers du bâtiment. En cas de non-respect du niveau de référence, les conséquences devraient elles aussi être adaptées à la situation. Par exemple, les conséquences pour les responsables des logements pourraient être de fournir des résultats de mesure (par exemple à une autorité ou à l'acheteur) ou l'obligation d'entreprendre des actions de réduction.

(91) Dans la plupart des lieux de travail, les expositions des travailleurs au radon sont fortuites et sont davantage liées à l'emplacement du poste de travail qu'à l'activité professionnelle. Ces expositions ne sont pas considérées comme des expositions professionnelles selon la définition de la Commission. Ces considérations ne portent

pas atteinte à la responsabilité juridique de l'employeur à l'égard de ses employés. Dans cette catégorie, les lieux de travail incluent la plupart des bâtiments à vocation mixte, tels que les écoles, les hôpitaux, les bureaux de poste, les prisons, les boutiques, les cinémas, les espaces de bureaux et les ateliers en général.

(92) Dans tous les lieux de travail où l'exposition au radon est considérée comme fortuite et non professionnelle, la première étape de l'approche graduée consiste à gérer le lieu de travail sur la base du niveau de référence opérationnel national (300 Bq.m^{-3} ou moins) et à mettre en œuvre le processus d'optimisation. La responsabilité juridique de l'employeur à l'égard de ses employés s'exerce par l'application des exigences réglementaires, des normes établies par consensus ou d'autres normes relatives à la maîtrise de l'exposition au radon dans les bâtiments, prévues dans le cadre de la mise en œuvre de la stratégie nationale correspondante.

(93) La relation entre une concentration de radon mesurée et la dose efficace correspondante dépend de plusieurs paramètres, dont le facteur d'équilibre, la durée d'exposition, etc. Ces paramètres peuvent varier considérablement d'un endroit à un autre. Par conséquent, si le niveau de référence opérationnel est dépassé sur un lieu de travail, cela ne signifie pas nécessairement que le niveau de référence en dose, qui représente des doses annuelles d'environ 10 mSv , sera dépassé.

(94) Ainsi, si des difficultés sont rencontrées sur les lieux de travail pour maintenir des concentrations de radon dans l'air intérieur en dessous du niveau de référence opérationnel, la stratégie de protection contre l'exposition au radon devrait prévoir, comme deuxième étape de l'approche graduée, la possibilité d'entreprendre davantage d'investigations en utilisant une approche plus réaliste. Cela signifie qu'il faut procéder à une évaluation de l'exposition au radon en tenant compte des paramètres réels de la situation d'exposition (la durée réelle d'occupation, la mesure des descendants du radon, par exemple). Les doses ainsi calculées devraient être comparées au niveau de référence pour la dose de 10 mSv.an^{-1} pour décider s'il faut engager d'autres actions, et si oui de quels types. À ce stade, l'objectif est toujours d'assurer la protection globale des usagers du bâtiment plutôt que de maîtriser les doses reçues par certains individus.

(95) Sur les lieux de travail où malgré tous les efforts raisonnablement entrepris pour réduire l'exposition au radon les doses individuelles resteraient supérieures à 10 mSv.an^{-1} , les travailleurs devraient être considérés comme professionnellement exposés et leur exposition devrait être gérée en appliquant les exigences de protection radiologique appropriées établies pour l'exposition professionnelle : identification des travailleurs exposés, information, formation, surveillance et enregistrement des doses (en termes de dose ou en concentration d'énergie alpha potentielle) et surveillance médicale. Dans tous les cas, les doses individuelles ne devraient pas dépasser la valeur maximale de l'intervalle de 1 à 20 mSv pour l'établissement de niveaux de référence dans les situations d'exposition existantes. Il s'agit de la troisième étape de l'approche graduée.

(96) Sur certains types de lieux de travail spécifiques, les autorités nationales peuvent décider que l'exposition des travailleurs au radon devrait être considérée comme une exposition professionnelle, qu'elle dépasse ou non le niveau de référence, car les travailleurs y sont exposés de manière inévitable et substantielle, et que cette exposition est clairement ou étroitement liée à leurs activités professionnelles. Il

conviendrait d'établir une liste de ces lieux de travail ou de ces activités professionnelles (mines et autres lieux de travail souterrains, stations thermales, par exemple) au niveau national.

(97) Sur les lieux de travail où l'exposition au radon des travailleurs est considérée comme professionnelle, la Commission recommande d'identifier les espaces concernés. Il peut s'agir de bâtiments individuels ou de certaines parties d'un bâtiment ou d'un site. Dans ces emplacements, l'employeur doit respecter les exigences relevant de l'exposition professionnelle et appliquer le principe d'optimisation. Si les autorités nationales décident qu'une situation d'exposition au radon doit être considérée comme une situation d'exposition planifiée, le plafonnement des doses sera probablement matérialisé par une limite de dose professionnelle (voir la section 3.4).

(98) Du point de vue de la Commission, la décision de considérer l'exposition des travailleurs au radon comme professionnelle ou non incomberait aux autorités nationales.

3.4. Application de limites de dose

(99) Selon la *Publication 103* (ICRP, 2007, §. 203), le principe d'application des limites de dose constitue le troisième principe fondamental du système de la CIPR. Il s'applique uniquement aux situations d'exposition planifiées et est relatif à l'individu. Cela signifie que la dose totale reçue par n'importe quel individu à partir de sources réglementées dans le cadre de situations d'exposition planifiées, autre que l'exposition médicale des patients, ne devrait pas dépasser les limites appropriées recommandées par la Commission. Par souci de cohérence, les limites de dose devraient s'appliquer dans les situations d'exposition au radon qui ont été d'emblée qualifiées de situations d'exposition planifiées par les autorités nationales, généralement lorsque les travailleurs sont considérés comme professionnellement exposés aux rayonnements. La limite de dose recommandée par la Commission pour l'exposition professionnelle est exprimée sous la forme d'une dose efficace de 20 mSv.an^{-1} , moyennée sur 5 ans (100 mSv en 5 ans). La Commission précise que la dose efficace ne devrait pas dépasser 50 mSv au cours d'une année donnée (ICRP, 2007, §. 244).

3.5. Résumé

(100) La figure 3.3 illustre l'approche générale désormais recommandée pour la gestion des diverses situations d'exposition au radon.

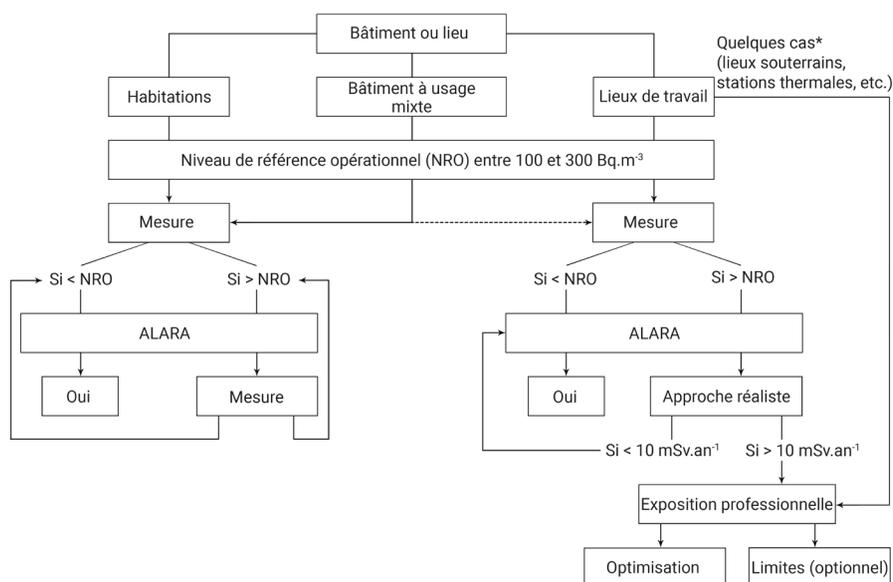


Figure 3.3. Approche générale pour la gestion de l'exposition au radon. ALARA est l'acronyme de *as low as reasonably achievable*, qui signifie « aussi bas que raisonnablement possible », en tenant compte des circonstances économiques et sociétales.

* Lieux de travail où l'exposition au radon est d'emblée considérée comme professionnelle par les autorités nationales.

4

Mise en œuvre des stratégies de protection

4.1. Plan national d'action

(101) Un plan national d'action relatif à l'exposition au radon devrait être élaboré par les autorités nationales en collaboration avec les parties prenantes concernées. L'objectif est de réduire le risque collectif pour la population et le risque individuel d'exposition au radon dans l'air intérieur en mettant en œuvre le principe d'optimisation.

(102) Le plan d'action devrait établir un cadre de travail avec une infrastructure claire, déterminer les priorités et les responsabilités et décrire les différentes étapes pour gérer l'exposition au radon dans le pays. Suivant les conditions d'exposition, les diverses parties prenantes devraient être identifiées, notamment les personnes exposées et celles devant fournir un soutien ou entreprendre des actions. En outre, le plan d'action devrait aborder les questions d'éthique, notamment celles associées aux responsabilités, et fournir des informations, des recommandations, de l'assistance, ainsi que les conditions nécessaires pour sa mise en œuvre de façon durable. Le plan national d'action relatif à l'exposition au radon devrait, dans la mesure du possible, être intégré de manière cohérente aux autres stratégies relatives aux bâtiments, comme celles sur la qualité de l'air intérieur ou sur les économies d'énergie, afin de développer des synergies et d'éviter les contradictions.

(103) La mise en œuvre du plan national d'action relatif à l'exposition au radon requiert une coopération entre les autorités locales, régionales et nationales compétentes dans différents domaines (protection radiologique, santé publique, travail, aménagement du territoire, logement, construction de bâtiments, etc.), différentes disciplines professionnelles (architectes et autres professionnels du bâtiment, spécialistes en protection radiologique, inspecteurs du domaine de la santé publique, professionnels de santé, etc.), différents types d'organisations de soutien (experts, organismes d'assistance, associations, etc.) et différents individus ou institutions responsables.

(104) Le plan d'action peut contenir à la fois des mesures incitatives et des dispositions obligatoires. Étant donné que les actions à entreprendre en matière de

protection contre l'exposition au radon incomberont souvent à des individus dont on ne peut pas attendre qu'ils appliquent un processus détaillé d'optimisation, le plan d'action devrait leur fournir les informations et l'assistance appropriées, afin qu'ils puissent traiter eux-mêmes les problèmes liés à l'exposition au radon par des actions d'autoprotection, comme l'auto-mesurage ou l'accès à des services de mesures compétents, l'utilisation adéquate des bâtiments ainsi que des techniques simples de réduction.

(105) Une campagne de mesure nationale de la concentration du radon devrait être menée, en utilisant des protocoles et des appareils de mesure reconnus, afin de déterminer la distribution des concentrations représentatives de l'exposition au radon de la population d'un pays. Les deux principaux objectifs d'une telle campagne devraient être les suivants :

- estimer l'exposition moyenne de la population au radon dans l'air intérieur et la distribution des expositions – ce qui peut être réalisé par une campagne de mesure de la concentration du radon sur le long terme dans des habitations sélectionnées représentatives, en appliquant une pondération en fonction de la population ; et
- identifier les territoires où des concentrations de radon dans l'air intérieur significativement élevées sont les plus susceptibles d'être mesurées (c'est-à-dire les territoires exposés au radon). Ce zonage peut être réalisé de manière optimale en le combinant aux mesures de la concentration du radon réalisées à long terme dans les habitations sélectionnées.

(106) Des cartographies de la concentration du radon peuvent être utilisées comme outil pour optimiser la recherche des habitations et autres bâtiments présentant des concentrations élevées de radon et identifier les territoires nécessitant des actions de prévention spéciales lors de la planification et la construction de nouveaux bâtiments. Toutefois, les estimations résultant de ces campagnes devraient être confirmées par des mesures effectuées régulièrement dans des bâtiments sélectionnés au sein des territoires suspectés d'être exposés au radon.

(107) Les territoires exposés au radon peuvent être identifiés indirectement en se basant sur les concentrations de gaz radon présent dans le sol (sous réserve qu'il existe des facteurs de transfert établis mettant en corrélation les concentrations de radon à l'intérieur des habitations et celles de ce gaz dans le sol, sous les fondations d'un bâtiment) ou directement en s'appuyant sur les mesures de la concentration du radon dans l'air intérieur. Les données géologiques peuvent être utilisées dans le cadre de ce processus. La définition de ce qu'est un territoire exposé au radon varie toutefois d'un pays à l'autre. Ce concept peut être défini au regard de découpages administratifs ou d'autres secteurs géographiques existants et être fondé sur différents critères, tels que la concentration moyenne (c'est-à-dire la valeur moyenne arithmétique, la valeur médiane pour une distribution géométrique), la proportion de bâtiments dépassant le niveau de référence opérationnel et la probabilité de dépasser ce niveau. La définition d'un territoire exposé au radon devrait être précisée dans le plan national d'action relatif à l'exposition au radon.

(108) Même dans les territoires confirmés comme étant exposés au radon, la distribution des concentrations de radon dans les bâtiments est souvent très large, et les valeurs peuvent être faibles dans la plupart d'entre eux. Inversement, même dans les zones non répertoriées comme étant exposées au radon, des bâtiments peuvent présenter des concentrations élevées de radon mais avec une probabilité moindre.

Par conséquent, outre l'identification des territoires exposés au radon, il conviendrait de s'efforcer d'identifier les caractéristiques des bâtiments qui peuvent être associés à des concentrations élevées de radon.

(109) Le plan national d'action relatif à l'exposition au radon peut comprendre des dispositions obligatoires, notamment au regard des responsabilités juridiques. Par exemple, les mesures, la communication et la conservation des résultats et le respect du niveau de référence opérationnel peuvent être imposés. Toutefois, le plan national d'action relatif à l'exposition au radon devrait également inclure des mesures incitatives et de soutien, comme l'organisation de campagnes de mesure, des programmes d'amélioration de la protection contre l'exposition au radon dans les habitations et, le cas échéant, des mesures fiscales ou de soutien financier. De telles mesures devraient être renouvelées régulièrement.

(110) Dans le plan national d'action, il conviendrait de prêter attention à tous les bâtiments accessibles au public, en donnant priorité à ceux occupés de façon prolongée comme les écoles, les crèches, les institutions de soins, les hôpitaux et les prisons. Les personnes présentes dans ces bâtiments n'ont souvent pas d'autres choix que de les utiliser et peuvent passer une grande partie de leur temps dedans, même s'il peut s'agir d'une situation temporaire. Ils peuvent ne pas être conscients qu'ils sont exposés à des concentrations de radon élevées et ne sont pas en position de réduire eux-mêmes leur niveau d'exposition.

(111) Pour les bâtiments utilisés à la fois par des membres du public et des travailleurs, le niveau de référence opérationnel devrait être le niveau utilisé pour les habitations. L'utilisation de niveaux de référence différents au sein d'un même lieu clos n'est pas recommandée.

(112) En outre, des actions de prévention et de réduction devraient être mises en œuvre pour se conformer au niveau de référence opérationnel. Il peut être requis de mesurer les concentrations de radon et de conserver les résultats. Des informations pertinentes devraient être communiquées aux membres du public qui utilisent le bâtiment, ainsi qu'au personnel travaillant à l'intérieur. Un soutien approprié devrait être apporté aux personnes responsables de ce type de bâtiment pour s'assurer qu'elles sont capables de respecter leurs responsabilités et obligations.

(113) Le plan national d'action peut prévoir une approche graduée applicable aux bâtiments accessibles au public, comme pour les lieux de travail sous le contrôle des autorités nationales (voir la section 3.3.5).

4.2. Prévention

(114) Une stratégie de protection contre l'exposition au radon devrait inclure des actions de prévention pour maîtriser toute exposition ultérieure au radon. Indépendamment du bâtiment ou du lieu, de la catégorie d'individus présents et du type de situation d'exposition, il est possible de gérer l'exposition au radon en la prenant en compte à la fois durant les phases de planification, de conception et de construction d'un bâtiment. Des actions de prévention sont mises en œuvre en s'appuyant sur les codes de construction et d'aménagement du territoire applicables aux bâtiments neufs et à la rénovation des anciens.

4.2.1. Aménagement du territoire aux échelles locale et régionale

(115) La probabilité qu'un quelconque bâtiment présente une concentration de radon élevée dans l'air intérieur est très variable, notamment du fait de l'extrême variété des conditions géologiques. Cette variabilité devrait être prise en compte durant les processus d'aménagement du territoire aux échelles locale et régionale, *a minima* dans les zones exposées au radon. Des cartes locales des concentrations de radon peuvent être établies sur la base des données géologiques, des mesures de la concentration du radon dans le sol ou de celles dans l'air intérieur des bâtiments existants (voir la section 4.1). Elles devraient être complétées par des données sur les concentrations de radon dans les bâtiments, dans les approvisionnements en eau provenant de puits forés, etc.

(116) Les cartographies locales des concentrations de radon et les données appropriées devraient être mises à disposition des autorités locales, régionales et nationales compétentes, des professionnels du bâtiment, des constructeurs d'habitations et de l'ensemble de la population, afin de les aider à concevoir, construire et rénover des bâtiments.

(117) Même si l'aménagement du territoire est une obligation pour laquelle une cartographie des concentrations de radon constitue un outil utile, elle ne peut pas être considérée comme donnant des résultats définitifs. Il n'est pas possible de prédire la concentration de radon dans un bâtiment donné avant sa construction. Des recherches plus approfondies, telles que des analyses du sol, pourraient s'avérer utiles. Toutefois, dans la mesure où la concentration de radon dans un bâtiment dépend de nombreux facteurs, seule une mesure réalisée à l'intérieur du bâtiment une fois qu'il sera achevé et occupé pourra fournir un résultat pertinent. Une cartographie des concentrations de radon ne devrait pas aboutir à des zones où des constructions seraient interdites du fait des concentrations de radon, sauf dans des cas très exceptionnels.

4.2.2. Codes et réglementations en matière de construction

(118) Les autorités locales, régionales ou nationales devraient envisager la mise en place de réglementations ou de codes en matière de construction qui exigent que soient prises des mesures de prévention contre l'exposition au radon pour les habitations et les bâtiments en construction ou soumis à des rénovations majeures. La mise en œuvre de mesures de prévention contre l'exposition au radon pendant la conception et la construction d'un bâtiment est considérée comme le moyen le plus avantageux pour protéger l'ensemble de la population. Si elles sont correctement mises en œuvre, de telles mesures permettront, au fil du temps, de faire baisser le niveau moyen de la concentration de radon à l'échelle nationale et réduiront le nombre de bâtiments neufs présentant des concentrations de radon proches de ou supérieures au niveau de référence opérationnel national.

(119) Il est important de veiller à la conformité des réglementations et des codes en matière de construction. Des programmes d'assurance qualité devraient être mis en place au niveau des professionnels ou au niveau réglementaire, selon le cas. Il est important de noter que ces réglementations et ces codes ne peuvent pas garantir à

eux seuls que les niveaux de concentration de radon dans les bâtiments neufs seront inférieurs au niveau de référence opérationnel. Par conséquent, les propriétaires et les gestionnaires de bâtiments devraient être informés du fait que la seule façon de connaître la situation du bâtiment vis-à-vis de l'exposition au radon est d'effectuer des mesures de sa concentration. Des démarches correctives visant à réduire la concentration de radon après la construction devraient être envisagées, le cas échéant.

4.3. Actions de réduction

(120) Une stratégie nationale de protection contre l'exposition au radon devrait également inclure des actions de réduction de sa concentration dans les bâtiments existants ou des lieux avec des espaces clos. La maîtrise de l'exposition devrait être assurée autant que possible par la gestion du bâtiment (ou du lieu) et les conditions de son utilisation, quelle que soit la catégorie d'individus présents à l'intérieur. Les principales étapes consistent à réaliser des mesures de la concentration de radon et, si nécessaire, à entreprendre des actions de protection.

4.3.1. Protocoles et techniques de mesure de la concentration du radon

(121) Les mesures de la concentration du radon effectuées dans un bâtiment ou un lieu donné devraient viser à produire une estimation fiable de l'exposition au radon à long terme des occupants, en tenant compte de nombreux facteurs, tels que le taux d'occupation du bâtiment et la variabilité de la concentration journalière ou saisonnière. L'assurance qualité et la fiabilité des mesures de la concentration du radon constituent des conditions préalables importantes. Par conséquent, des protocoles de mesure de la concentration du radon devraient être établis, réexaminés régulièrement et mis à jour, le cas échéant. Des méthodes de mesure normalisées ont été développées (ISO, 2012a-g).

(122) Il est préférable, idéalement, d'effectuer des mesures de la concentration du radon à long terme sur une année entière pour couvrir toutes les saisons, plutôt que de réaliser des mesures de court terme. Cependant, des périodes plus courtes, allant de quelques semaines à quelques mois, sont souvent choisies car une période trop longue peut entraîner des difficultés, du fait que les détecteurs ont tendance à être déplacés ou oubliés. Des mesures fiables devraient être représentatives de la concentration moyenne annuelle, et des ajustements saisonniers pourraient être appliqués. Les mesures devraient être réalisées à des coûts faibles ou modestes. Les appareils de mesure devraient être facilement disponibles et afficher des instructions d'utilisation claires. Après des actions de réduction, une mesure réalisée dans les mêmes conditions que la mesure initiale est nécessaire pour tester l'efficacité du dispositif de réduction. Ces mesures devraient être répétées périodiquement pour s'assurer que la situation ne se détériore pas avec le temps.

(123) Lors de l'utilisation de mesures de la concentration des descendants du radon 222 dans les habitations et sur les lieux de travail courants, la conversion en une concentration de radon est réalisée en se basant sur un facteur d'équilibre générique pris par défaut égal à 0,4 entre le gaz radon et ses descendants dans l'air intérieur, sauf indication contraire.

4.3.2. Méthodes de réduction de l'exposition au radon et leur applicabilité dans différentes situations

(124) Les principales méthodes permettant de réduire l'exposition au radon consistent à l'empêcher de pénétrer dans les espaces occupés et à l'extraire de l'air intérieur au moyen de techniques tant passives qu'actives.

(125) Les techniques de base de réduction de la concentration de radon visent à limiter son entrée par convection et par diffusion à partir du sol situé sous le bâtiment. Elles se concentrent sur les actions suivantes :

- renforcer l'étanchéité à l'air de l'enveloppe du bâtiment (sceller les voies de pénétration du radon, par exemple) ; et
- inverser les différences de pression d'air entre l'espace intérieur occupé et le sol extérieur au moyen de différentes techniques de dépressurisation du sol (par exemple en réduisant la pression dans le sol sous le bâtiment, en installant un système de puisard à radon, en appliquant une surpression dans la cave, etc.).

(126) La réduction de la concentration de radon dans l'air intérieur par dilution avec de l'air extérieur est une autre technique de réduction utilisée dans les habitations. Elle peut être obtenue par des dispositifs passifs ou actifs de ventilation des espaces occupés. Une ventilation compensée peut être utilisée pour chauffer ou refroidir un environnement intérieur. La ventilation compensée par aspiration ne crée ni pression ni dépression dans l'air intérieur par rapport à l'air extérieur et celui dans le sol. Cette technique de ventilation dilue la concentration de radon une fois qu'il a pénétré dans le bâtiment. Une ventilation forcée peut diluer la concentration de radon présent dans l'air intérieur après sa pénétration dans le bâtiment et réduire les différences de pression entre le sol et l'espace occupé. Certaines de ces solutions ne sont pas adaptées à tous les types de bâtiments ou à tous les niveaux de concentration de radon. Dans plusieurs cas, c'est une combinaison de ces techniques qui permet de réduire au maximum la concentration de radon.

(127) Pour les bâtiments où un puits artésien sert de source d'approvisionnement en eau, cette eau peut être une source potentielle de radon. Lorsque l'eau dégaze du radon dans l'atmosphère d'une pièce (en particulier en cas de pulvérisation d'eau), des expositions significatives à court terme peuvent se produire. Les techniques visant à atténuer l'entrée du radon dans l'air ambiant à partir de l'eau consistent principalement au dégazage de l'eau avant son utilisation ou à sa filtration au moyen de lits de charbon actif.

(128) Des guides détaillés présentant les différentes techniques de réduction développées par des organismes nationaux ou internationaux sont disponibles (WHO, 2009).

4.4. *Matériaux de construction*

(129) Les matériaux de construction ont généralement une importance mineure sur l'exposition au radon mais il existe des cas particuliers où une source d'exposition au radon 222 ne peut pas être négligée. En outre, la concentration en thorium dans les matériaux de construction (béton, briques, etc.) est généralement la seule source de radon 220 dans l'air intérieur. Par conséquent, la maîtrise des concentrations de thorium dans les matériaux de construction utilisés pour l'enduit de surface (plâtre, etc.) des murs, plafonds et planchers, peut réduire la probabilité d'avoir des niveaux élevés de concentration de radon 220 dans les bâtiments. Pour prévenir et optimiser l'impact dû aux matériaux de construction, il convient de privilégier des matériaux à faibles teneurs en radium 226 et en thorium 232. Un système de référence a été établi (c'est-à-dire un indice de concentration radioactive) pour caractériser le risque associé aux rayonnements gamma émis par des matériaux de construction spécifiques et pour préciser leurs conditions d'utilisation (EC, 1999). En général, si le rayonnement gamma émis par les matériaux de construction est maîtrisé, l'exhalation de radon ne génère pas de concentrations dans l'air intérieur significatives par rapport au niveau de référence opérationnel. L'utilisation de matériaux de construction émettant de fortes quantités de radon 220 ou de radon 222 nécessiterait une justification.

4.5. *Protection des travailleurs*

(130) Sur les lieux de travail où l'exposition des travailleurs au radon n'est pas considérée comme une exposition professionnelle, ces derniers sont traités de la même manière que les membres du public du point de vue de la protection radiologique. Toutefois, lorsque les lieux de travail ne sont pas accessibles au public (ou lorsque l'accès du public est très limité dans le temps), des dispositions spécifiques ou complémentaires peuvent être introduites dans le cadre de la mise en œuvre du processus d'optimisation en application de l'approche graduée en matière de protection. Ces dispositions peuvent être :

- des protocoles de mesure spécifiques (par exemple des analyses effectuées aux moments et aux endroits où les travailleurs sont présents) ;
- l'utilisation spécifique du niveau de référence opérationnel en tenant compte des paramètres réels d'exposition, tels que le temps d'occupation ou le facteur d'équilibre, en conservant la valeur de 10 mSv.an^{-1} comme niveau de référence en dose ;
- l'aménagement des conditions de travail (par exemple en limitant le temps d'occupation dans certains locaux) ; et
- des exigences concernant la réalisation des mesures, la communication et l'enregistrement des résultats, et le respect du niveau de référence.

(131) Une expertise externe peut être nécessaire pour mettre en œuvre de telles dispositions, ainsi que leur supervision par des autorités nationales.

(132) Sur les lieux de travail où l'exposition des travailleurs au radon est considérée comme professionnelle, la direction opérationnelle et les autorités nationales devront déterminer les exigences à respecter. Les exigences généralement pertinentes en matière d'exposition au radon sont les suivantes :

- définition d'un niveau de référence approprié – exprimé en dose efficace, en concentration de radon ou d'énergie alpha potentielle – en tenant compte de la durée d'exposition ;
- détermination des zones de travail concernées ; bien que la classification de zones contrôlées ou surveillées ne soit pas vraiment adaptée à la situation, il reste important de déterminer les zones dans lesquelles une exposition professionnelle peut se produire et de contrôler, le cas échéant, l'accès à ces zones ;
- information, instruction et formation adéquates des travailleurs ;
- utilisation d'équipements de protection individuelle dans certains cas exceptionnels ;
- contrôle des expositions par surveillance individuelle, par surveillance collective ou, si cela est inapproprié, inadéquat ou irréalisable, par déduction à partir de la surveillance du lieu de travail ;
- enregistrement des expositions ;
- mise en place d'une surveillance sanitaire des travailleurs ;
- promotion de la culture de protection radiologique ; et
- respect du niveau de référence. Il peut s'agir d'une surveillance de la zone de travail combinée à un suivi du temps passé dans des lieux de travail spécifiques. Des dosimètres personnels pour la mesure de l'exposition au radon peuvent également être utilisés soit pour établir une moyenne de groupe, soit à titre individuel. Dans tous les cas, une dose de 20 mSv.an^{-1} ne devrait pas être dépassée.

4.6. Protection des travailleurs contre l'exposition au radon dans l'industrie des mines d'uranium

(133) Les autorités nationales peuvent décider d'emblée de gérer certaines expositions professionnelles au radon comme des situations d'exposition planifiées. C'est typiquement le cas pour l'industrie des mines d'uranium. Les facteurs qui influencent ce choix incluent les niveaux d'exposition à d'autres sources dans la mine, dont l'exposition externe aux rayonnements gamma et l'inhalation ou l'ingestion de poussières radioactives. La poussière contenant des radionucléides à vie longue peut dériver du minerai d'uranium au cours de l'extraction et des premières étapes du broyage ou bien être de l'uranium raffiné qui se présente souvent sous la forme

d'une poudre d'oxyde d'uranium. En outre, des expositions à d'autres radionucléides de la chaîne de désintégration de l'uranium peuvent potentiellement se produire suivant le processus utilisé. Dans les mines d'uranium, les descendants du radon peuvent constituer la source principale d'exposition aux rayonnements. La protection des travailleurs contre l'exposition au radon dans l'industrie des mines d'uranium et de thorium est considérée comme relevant de la responsabilité de la direction opérationnelle.

(134) Selon le système de la CIPR, les expositions dans le cadre d'une situation d'exposition planifiée devraient être maîtrisées par l'application du processus d'optimisation, en utilisant des contraintes de dose, et par celle de limites de dose. Idéalement, une contrainte de dose devrait être déterminée au stade de la conception d'une opération. La nature des gisements contenant des minerais radioactifs est extrêmement variable ; diverses approches et méthodes d'exploitation minière sont donc nécessaires pour extraire la ressource avec succès. Par conséquent, les contraintes de dose et les résultats du processus d'optimisation varieront d'une mine à l'autre et, dans certains cas, varieront sur un même site au fil du temps, à mesure que les conditions physiques changent.

(135) Les principes utilisés pour maîtriser les expositions professionnelles au radon et à ses descendants dans une mine d'uranium sont similaires à ceux employés sur d'autres lieux de travail dans des situations d'exposition planifiées. Il s'agit tout d'abord de concevoir soigneusement le lieu de travail puis d'utiliser des mesures techniques appropriées destinées à réduire et maîtriser les expositions au radon. Dans certains cas, le risque d'être exposé à des niveaux de forte amplitude et/ou élevés de concentration de radon et de ses descendants est grand dans les mines d'uranium en raison de l'intensité du terme source et d'autres contraintes physiques (le travail souterrain, par exemple). Dans ces cas, il convient d'accorder une attention toute particulière aux détails du programme de surveillance pour s'assurer que les conditions de travail et les doses reçues par les travailleurs sont évaluées convenablement. Des stratégies impliquant par exemple des détecteurs en temps réel et des dosimètres individuels devraient être envisagées quand les concentrations de radon sont élevées et de forte amplitude. Inversement, quand les concentrations de radon et de ses descendants sont faibles et stables, une surveillance périodique du lieu de travail pourrait suffire. Généralement, en cas de ventilation active des lieux de travail, il ne suffit pas de se fier à la concentration de gaz radon et aux approximations concernant les conditions d'équilibre pour évaluer les expositions aux descendants du radon. Par conséquent, il conviendrait d'utiliser des mesures de la concentration des descendants du radon (c'est-à-dire la concentration d'énergie alpha potentielle).

(136) La conversion des expositions aux descendants du radon en doses nécessite d'utiliser des facteurs de conversion. Auparavant (ICRP, 1993), ces facteurs étaient basés, pour les descendants du radon, sur des études épidémiologiques. La Commission propose désormais de calculer les coefficients de dose efficace après une exposition aux descendants du radon en utilisant les modèles de référence biocinétiques et dosimétriques de la CIPR, avec des facteurs de pondération spécifiques au rayonnement et au tissu exposé (ICRP, 2010). Ces coefficients de dose remplaceront la convention de conversion en dose basée sur l'épidémiologie.

4.7. Interactions avec les parties prenantes

(137) La première étape pour assurer le soutien d'une stratégie nationale de protection contre l'exposition au radon, est de développer la sensibilisation sur le sujet, qui semble très faible dans de nombreux pays. Des informations facilement accessibles sur le radon, la manière dont il peut être piégé dans des espaces clos, les risques associés et les moyens d'identifier et de réduire les concentrations élevées, devraient être diffusées auprès de l'ensemble de la population, notamment par l'intermédiaire des représentants élus, des fonctionnaires, des propriétaires, des bailleurs, des employeurs, des enfants scolarisés, etc.

(138) La formation de professionnels sur le sujet de l'exposition au radon (constructeurs, architectes, personnes compétentes en protection radiologique, employeurs, syndicats, travailleurs, par exemple) contribuera à la conception, la planification et la mise en œuvre adéquates des mesures de prévention et de réduction recommandées. Les programmes de formation destinés aux professionnels devraient faire partie intégrante du plan national d'action relatif à l'exposition au radon, de sorte que les propriétaires ou les occupants faisant face à des concentrations de radon supérieures ou proches du niveau de référence opérationnel puissent accéder à une infrastructure de prévention et de réduction de l'exposition au radon. Des informations et des formations appropriées devraient également être fournies aux autres professionnels concernés (par exemple dans les domaines de la santé et de l'immobilier).

(139) Dans la mesure où la synergie entre l'exposition au radon et le tabagisme a été démontrée lors de l'évaluation des risques de cancer du poumon, il est justifié de faire un lien entre les programmes de santé publique pour la réduction de l'exposition au radon et les politiques sur la lutte antitabac, au moins en termes d'avertissement.

(140) Les plans nationaux d'action relatifs à l'exposition au radon devraient prévoir des dispositions relatives à la diffusion d'informations sur le coût et l'efficacité des actions de prévention et de réduction. Des données devraient être collectées régulièrement à différents niveaux (local, régional et national) et mises à la disposition des diverses parties prenantes.

5

Conclusions

(141) Ce rapport a pour but de fournir des recommandations actualisées concernant la protection radiologique contre l'exposition au radon qui tiennent compte de l'évolution du système de protection radiologique (ICRP, 2006b, 2007), des nouvelles connaissances en matière de risques pour la santé associés à l'exposition au radon (UNSCEAR, 2009 ; WHO, 2009 ; ICRP, 2010) et de l'expérience acquise par de nombreux pays et organisations internationales au cours de ces dernières années.

(142) Dans ses recommandations antérieures sur le même sujet (ICRP, 1993, 2007), la Commission préconisait une stratégie basée sur la distinction entre les approches de protection pour les habitations et pour les lieux de travail. La Commission recommande désormais une approche intégrée de la protection contre l'exposition au radon dans tous les bâtiments, quels que soient leur vocation et le statut de leurs occupants. La stratégie de protection dans les bâtiments, mise en œuvre par le biais d'un plan national d'action, repose sur l'application du principe d'optimisation en dessous d'un niveau de référence opérationnel, fixé en termes d'une concentration dans l'air. La Commission encourage les autorités nationales à établir un niveau de référence opérationnel qui soit aussi bas que raisonnablement possible dans l'intervalle compris entre 100 et 300 Bq.m⁻³, en tenant compte des circonstances économiques et sociétales qui prévalent.

(143) L'objectif de cette nouvelle approche, graduée en fonction de la situation d'exposition, est de couvrir tous les bâtiments du point de vue de la santé publique (habitations, bâtiments à usage mixte et lieux de travail), au moins dans les zones exposées au radon. La Commission souligne le rôle des actions de prévention, principalement par le biais des codes de construction, dans tous les types de bâtiments.

(144) Ce rapport propose des recommandations sur la gestion de situations spécifiques d'exposition au radon, dans lesquelles les travailleurs sont considérés comme professionnellement exposés. Il couvre les situations d'exposition dans lesquelles il n'a pas été possible de respecter le niveau de référence ou qui figurent sur une liste d'activités ou d'installations établie par les autorités nationales. La stratégie de protection repose dès lors sur l'application du principe d'optimisation

et des exigences pertinentes en matière d'exposition professionnelle. La limite de dose professionnelle devrait s'appliquer lorsque les autorités nationales estiment que la situation d'exposition au radon doit être traitée comme une situation d'exposition planifiée.

(145) En recommandant une approche simple, intégrée et graduée pour la plupart des situations d'exposition au radon, la Commission espère une réduction de l'exposition au radon, qui constitue de loin la principale source d'exposition du public à l'échelle mondiale.

6

Références

Cothorn, C.R., Smith, Jr, J.E., 1987. *Environmental Radon*. Plenum Press, New York, pp. 98–107.

Darby, S., Hill, D., Auvinen, A., *et al.*, 2005. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ* 330, 223–227.

Darby, S., Hill, D., Deo, H., *et al.*, 2006. Residential radon and lung cancer – detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14,208 persons without lung cancer from 13 epidemiological studies in Europe. *Scand. J. Work Environ. Health* 32 (Suppl. 1), 1–84.

EC, 1999. *Radiological Protection Principles Concerning the Natural Radioactivity of Building Materials*. Radiation Protection 112. European Commission, Luxembourg.

EPA, 1999. *Proposed Methodology for Assessing Risks from Indoor Radon Based on BEIR VI*. Office of Radiation and Indoor Air, United States Environmental Protection Agency, Washington, DC.

EPA, 2003. *Assessment of Risks from Radon in Homes*. Publication EPA 402-R-1107 03-003. Office of Air and Radiation, United States Environmental Protection Agency, Washington, DC.

EURATOM, 2014. Directive 2013/59/EURATOM du Conseil du 5 décembre 2013 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire contre les dangers résultant de l'exposition aux rayonnements ionisants. JO de l'Union eur. L 13, 1–73. Disponible sur : <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2014:013:0001:0073:EN:PDF> (dernier accès le 3 mai 2014).

Haerting, F.H., Hesse, W., 1879. Der Lungenkrebs, die Bergkrankheit in den Schneeberger Gruben. *V. gericht. Med. Öff. Gesund Wes.* 30, 296–309 et 31, 102–132, 313–337 (en allemand, avec résumé en anglais).

HPA, 2009. Radon and Public Health. Report of the Independent Advisory Group on Ionising Radiation. Health Protection Agency, Chilton.

Hultqvist, B., 1956. Studies on Naturally Occurring Ionising Radiations. Thesis. K. svenska VetenskAkad. Handl. 6(3). Almqvist u. Wiksells Boktryckeri, Stockholm.

IAEA, FAO, ILO, OECD/NEA, PAHO, UNEP, WHO, 2011. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards – Interim Edition. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3 (Interim). International Atomic Energy Agency, Vienna. Available at: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/p1531interim_web.pdf (last accessed 3 May 2014).

IARC, 1988. IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Man-made Fibres and Radon. IARC, Vol. 43. International Agency for Research on Cancer [Centre international de recherche sur le cancer, CIRC], Lyon.

ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21(1–3).

ICRP, 1993. Protection against radon-222 at home and at work. ICRP Publication 65. Ann. ICRP 23(2).

ICRP, 2006a. Human alimentary tract model for radiological protection. ICRP Publication 100. Ann. ICRP 36(1/2).

ICRP, 2006b. The optimisation of Radiological Protection: Broadening the Process. ICRP Publication 101, Part 2. Ann. ICRP 36(3).

ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection [Recommandations 2007 de la Commission internationale de protection radiologique]. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37(2–4).

ICRP, 2009. Application of the Commission's Recommendations to the Protection of People Living in Long-Term Contaminated Areas after a Nuclear Accident or a Radiation Emergency. ICRP Publication 111. Ann. ICRP 39(3).

ICRP, 2010. Lung cancer risk from radon and progeny and Statement on Radon. ICRP Publication 115. Ann. ICRP 40(1).

ICRP, 2014a. Occupational intakes of radionuclides Part 1. ICRP Publication 130. Ann. ICRP 44(2).

ICRP, 2014b. Occupational intakes of radionuclides Part 3. ICRP Publication 137. Ann. ICRP 46(3/4).

ISO, 2012a. 11665 – Partie 1 : Air : radon 222 – Origine du radon et de ses descendants à vie courte, et méthodes de mesure associées. Organisation internationale de normalisation, Genève.

ISO, 2012b. 11665 – Partie 2 : Air : radon 222 – Méthode de mesure intégrée pour la détermination de l'énergie alpha potentielle volumique moyenne de ses descendants à vie courte. Organisation internationale de normalisation, Genève.

ISO, 2012c. 11665 – Partie 3 : Air : radon 222 – Méthode de mesure ponctuelle de l'énergie alpha potentielle volumique de ses descendants à vie courte. Organisation internationale de normalisation, Genève.

ISO, 2012d. 11665 – Partie 4 : Air : radon 222 – Méthode de mesure intégrée pour la détermination de l'activité volumique moyenne du radon avec un prélèvement passif et une analyse en différé. Organisation internationale de normalisation, Genève.

ISO, 2012e. 11665 – Partie 5 : Air : radon 222 – Méthode de mesure en continu de l'activité volumique. Organisation internationale de normalisation, Genève.

ISO, 2012f. 11665 – Partie 6 : Air : radon 222 – Méthode de mesure ponctuelle de l'activité volumique. Organisation internationale de normalisation, Genève.

ISO, 2012g. 11665 – Partie 7 : Air : radon 222 – Méthode d'estimation du flux surfacique d'exhalation par la méthode d'accumulation. Organisation internationale de normalisation, Genève.

Krewski, D., Lubin, J.H., Zielinski, J.M., *et al.*, 2006. A combined analysis of North American case-control studies of residential radon and lung cancer. *J. Toxicol. Environ. Health, Part A* 69, 533–597.

Lubin, J.H., Tomasek, L., Edling, C., *et al.*, 1997. Estimating lung cancer mortality from residential radon using data for low exposures of miners. *Radiat. Res.* 147, 126–134.

Lubin, J.H., Wang, Z.Y., Boice, Jr, J.D., *et al.*, 2004. Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies. *Int. J. Cancer* 109, 132–137.

Ludewig, P., Lorenzer, E., 1924. Untersuchungen der Grubenluft in den Schneeberger Gruben auf den Gehalt von Radium-Emanation. *Z. Phys.* 22, 178–185.

Marsh, J.W., Bailey, M.R., 2013. A review of lung-to-blood absorption rates for radon progeny. *Radiat. Prot. Dosim.* 157, 499–514.

Marsh, J.W., Harrison, J.D., Laurier, D., *et al.*, 2010. Dose conversion factors for radon: recent developments. *Health Phys.* 99, 511–516.

NRC, 1998. Health Effects of Exposure to Radon. BEIR VI Report. National Research Council, Washington, DC.

Skeppström, K., Olofsson, B., 2007. Uranium and radon in groundwater: an overview of the problem. *Eur. Water* 17/18, 51–62.

STUK, 2008. Indoor Radon Mitigation. STUK-A229. Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK), Helsinki (en finnois).

Tomášek, L., Rogel, A., Tirmarche, M., *et al.*, 2008. Lung cancer in French and Czech uranium miners – risk at low exposure rates and modifying effects of time since exposure and age at exposure. *Radiat. Res.* 169, 125–137.

UNSCEAR, 2000. UNSCEAR 2000 Report: Annex B. Exposure from Natural Radiation Sources. United Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.

[UNSCEAR, 2009](#). UNSCEAR 2006 Report: Annex E: Source-to-effects Assessment for Radon in Homes and Workplaces. United Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.

WHO, 1986. Indoor Air Quality Research: Report on a WHO Meeting, Stockholm, 27–31 August 1984. World Health Organization, Copenhagen. [WHO, 2009](#). WHO Handbook on Indoor Radon. A Public Health Perspective. World Health Organization, Geneva.

[Winkler, R.](#), Ruckerbauer, F., Bunzl, K., 2001. Radon concentration in soil gas: a comparison of the variability resulting from different methods, spatial heterogeneity and seasonal fluctuations. *Sci. Total Environ.* 272, 273–282.

PUBLICATION 126 DE LA CIPR

PROTECTION RADIOLOGIQUE CONTRE L'EXPOSITION AU RADON

Créée en 1928 à la demande des médecins radiologues, la Commission internationale de protection radiologique (CIPR/ICRP) publie des recommandations concernant l'ensemble des situations auxquelles l'homme peut être confronté lorsqu'il est soumis aux rayonnements ionisants, qu'ils soient d'origine naturelle ou artificielle.

La présente publication présente une nouvelle étape dans l'évolution des recommandations de la CIPR en matière de protection contre l'exposition au radon qui clarifie l'application du système proposé en 2007 pour la protection du public et des travailleurs dans les habitations, sur les lieux de travail et dans d'autres types de lieux. Elle y préconise une approche simple et intégrée de la protection de tous les publics dans tous les bâtiments, quels que soient leur usage et le statut de leurs occupants et graduée en fonction de la situation d'exposition. Elle est basée sur l'application du principe d'optimisation en dessous d'un niveau de référence opérationnel, fixé en termes d'une concentration dans l'air. Il y est souligné le rôle des actions de réduction dans les bâtiments existants et de prévention dans les bâtiments neufs par le biais de codes de construction ainsi que les recommandations sur la gestion de l'exposition des travailleurs considérés comme professionnellement exposés.

Sur la base des dernières conclusions relatives au risque de développer un cancer du poumon associé à l'exposition au radon, la Commission encourage les autorités nationales à établir un niveau de référence opérationnel qui soit aussi bas que raisonnablement possible et qui tienne compte des circonstances économiques et sociétales qui prévalent.



IRSN
INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

31, avenue de la Division Leclerc
92260 Fontenay-aux-Roses
RCS Nanterre b 440 546 018

COURRIER
B.P. 17 - 92262 Fontenay-aux-
Roses Cedex

TÉLÉPHONE
+33 (0)1 58 35 88 88

SITE INTERNET
www.irsn.fr

E-MAIL
contact@irsn.fr
 [@irsn_france](https://twitter.com/irsn_france)