Normes de sûreté de l'AIEA

pour la protection des personnes et de l'environnement

Protection du public contre l'exposition due au radon et autres sources naturelles de rayonnements dans un environnement intérieur

Publication établie sous les auspices de l'AIEA et de l'OMS





Guide de sûreté particulier

N° SSG-32



NORMES DE SÛRETÉ DE L'AIEA ET PUBLICATIONS CONNEXES

NORMES DE SÛRETÉ

En vertu de l'article III de son Statut, l'AIEA a pour attributions d'établir ou d'adopter des normes de sûreté destinées à protéger la santé et à réduire au minimum les dangers auxquels sont exposés les personnes et les biens et de prendre des dispositions pour l'application de ces normes.

Les publications par lesquelles l'AIEA établit des normes paraissent dans la collection **Normes de sûreté de l'AIEA**. Cette collection couvre la sûreté nucléaire, la sûreté radiologique, la sûreté du transport et la sûreté des déchets, et comporte les catégories suivantes : **fondements de sûreté, prescriptions de sûreté** et **guides de sûreté**.

Des informations sur le programme de normes de sûreté de l'AIEA sont disponibles sur le site web de l'AIEA :

www.iaea.org/fr/ressources/normes-de-surete

Le site donne accès aux textes en anglais des normes publiées et en projet. Les textes des normes publiées en arabe, chinois, espagnol, français et russe, le Glossaire de sûreté de l'AIEA et un rapport d'étape sur les normes de sûreté en préparation sont aussi disponibles. Pour d'autres informations, il convient de contacter l'AIEA à l'adresse suivante : Centre international de Vienne, B.P. 100, 1400 Vienne (Autriche).

Tous les utilisateurs des normes de sûreté sont invités à faire connaître à l'AIEA l'expérience qu'ils ont de cette utilisation (c'est-à-dire comme base de la réglementation nationale, pour des examens de la sûreté, pour des cours) afin que les normes continuent de répondre aux besoins des utilisateurs. Les informations peuvent être données sur le site web de l'AIEA, par courrier (à l'adresse ci-dessus) ou par courriel (Official.Mail@iaea.org).

PUBLICATIONS CONNEXES

L'AIEA prend des dispositions pour l'application des normes et, en vertu des articles III et VIII C de son Statut, elle favorise l'échange d'informations sur les activités nucléaires pacifiques et sert d'intermédiaire entre ses États Membres à cette fin.

Les rapports sur la sûreté dans le cadre des activités nucléaires sont publiés dans la collection **Rapports de sûreté**. Ces rapports donnent des exemples concrets et proposent des méthodes détaillées à l'appui des normes de sûreté.

Les autres publications de l'AIEA concernant la sûreté paraissent dans les collections Préparation et conduite des interventions d'urgence, Radiological Assessment Reports, INSAG Reports (Groupe international pour la sûreté nucléaire), Rapports techniques et TECDOC. L'AIEA édite aussi des rapports sur les accidents radiologiques, des manuels de formation et des manuels pratiques, ainsi que d'autres publications spéciales concernant la sûreté.

Les publications ayant trait à la sécurité paraissent dans la collection **Sécurité nucléaire** de l'AIEA.

La collection Énergie nucléaire de l'AIEA est constituée de publications informatives dont le but est d'encourager et de faciliter le développement et l'utilisation pratique de l'énergie nucléaire à des fins pacifiques, ainsi que la recherche dans ce domaine. Elle comprend des rapports et des guides sur l'état de la technologie et sur ses avancées, ainsi que sur des données d'expérience, des bonnes pratiques et des exemples concrets dans les domaines de l'électronucléaire, du cycle du combustible nucléaire, de la gestion des déchets radioactifs et du déclassement.

PROTECTION DU PUBLIC CONTRE L'EXPOSITION DUE AU RADON ET AUTRES SOURCES NATURELLES DE RAYONNEMENTS DANS UN ENVIRONNEMENT INTÉRIEUR



COLLECTION NORMES DE SÛRETÉ DE L'AIEA nº SSG-32

PROTECTION DU PUBLIC CONTRE L'EXPOSITION DUE AU RADON ET AUTRES SOURCES NATURELLES DE RAYONNEMENTS DANS UN ENVIRONNEMENT INTÉRIEUR

GUIDE DE SÛRETÉ PARTICULIER

ÉTABLI SOUS LES AUSPICES DE L'AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET DE L'ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ

AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE VIENNE, 2023

DROIT D'AUTEUR

Toutes les publications scientifiques et techniques de l'AIEA sont protégées par les dispositions de la Convention universelle sur le droit d'auteur adoptée en 1952 (Berne) et révisée en 1972 (Paris). Depuis, l'Organisation mondiale de la pro-priété intellectuelle (Genève) a étendu le droit d'auteur à la propriété intellectuelle sous forme électronique et virtuelle. La reproduction totale ou partielle des textes contenus dans les publications de l'AIEA sous forme imprimée ou élec-tronique est soumise à autorisation préalable et habituellement au versement de redevances. Les propositions de reproduction et de traduction à des fins non commerciales sont les bienvenues et examinées au cas par cas. Les demandes doivent être adressées à la Section d'édition de l'AIEA:

Unité de la promotion et de la vente Section d'édition Agence internationale de l'énergie atomique Centre international de Vienne B.P. 100 1400 Vienne (Autriche)

Télécopie : +43 1 26007 22529 Téléphone : +43 1 2600 22417

Courriel: sales.publications@iaea.org https://www.iaea.org/fr/publications

© AIEA, 2023

Imprimé par l'AIEA en Autriche Mars 2023 STI/PUB/1651

PROTECTION DU PUBLIC CONTRE
L'EXPOSITION DUE AU RADON ET AUTRES
SOURCES NATURELLES DE RAYONNEMENTS
DANS UN ENVIRONNEMENT INTÉRIEUR
AIEA, VIENNE, 2023
STI/PUB/1651
ISBN 978-92-0-234022-0 (imprimé)
ISBN 978-92-0-233922-4 (pdf)
ISSN 1020-5829

AVANT-PROPOS

De par son Statut, l'Agence a pour attribution « d'établir ou d'adopter [...] des normes de [sûreté] destinées à protéger la santé et à réduire au minimum les dangers auxquels sont exposés les personnes et les biens » – normes qu'elle doit appliquer à ses propres opérations et que les États peuvent appliquer en adoptant les dispositions réglementaires nécessaires en matière de sûreté nucléaire et radiologique. L'AIEA remplit cette mission en consultation avec les organes compétents des Nations Unies et les institutions spécialisées intéressées. Un ensemble complet de normes de grande qualité faisant l'objet d'un réexamen régulier est un élément clé d'un régime mondial de sûreté stable et durable, tout comme l'est l'assistance de l'AIEA pour l'application de ces normes.

L'AIEA a débuté son programme de normes de sûreté en 1958. L'accent ayant été mis sur la qualité, l'adéquation à l'usage final et l'amélioration constante, le recours aux normes de l'AIEA s'est généralisé dans le monde entier. La collection Normes de sûreté comprend désormais une série unifiée de principes fondamentaux de sûreté qui sont l'expression d'un consensus international sur ce qui doit constituer un degré élevé de protection et de sûreté. Avec l'appui solide de la Commission des normes de sûreté, l'AIEA s'efforce de promouvoir l'acceptation et l'application de ses normes dans le monde.

Les normes ne sont efficaces que si elles sont correctement appliquées dans la pratique. Les services de l'AIEA en matière de sûreté englobent la sûreté de la conception, du choix des sites et de l'ingénierie, la sûreté d'exploitation, la sûreté radiologique, la sûreté du transport des matières radioactives et la gestion sûre des déchets radioactifs, ainsi que l'organisation gouvernementale, les questions de réglementation, et la culture de sûreté dans les organisations. Ces services aident les États Membres dans l'application des normes et permettent de partager des données d'expérience et des idées utiles.

Réglementer la sûreté est une responsabilité nationale et de nombreux États ont décidé d'adopter les normes de l'AIEA dans leur réglementation nationale. Pour les parties aux diverses conventions internationales sur la sûreté, les normes de l'AIEA sont un moyen cohérent et fiable d'assurer un respect effectif des obligations découlant de ces conventions. Les normes sont aussi appliquées par les organismes de réglementation et les exploitants partout dans le monde pour accroître la sûreté de la production d'énergie d'origine nucléaire et des applications nucléaires en médecine et dans l'industrie, l'agriculture et la recherche.

La sûreté n'est pas une fin en soi mais est une condition sine qua non de la protection des personnes dans tous les États et de l'environnement, aujourd'hui et à l'avenir. Il faut évaluer et maîtriser les risques associés aux rayonnements ionisants sans limiter indûment le rôle joué par l'énergie nucléaire dans le

développement équitable et durable. Les gouvernements, les organismes de réglementation et les exploitants, où qu'ils soient, doivent veiller à ce que les matières nucléaires et les sources de rayonnements soient utilisées de manière bénéfique, sûre et éthique. Les normes de sûreté de l'AIEA sont conçues pour faciliter cette tâche, et j'encourage tous les États Membres à les utiliser.

PRÉFACE

Des prescriptions visant à protéger les personnes contre les effets nocifs de l'exposition aux rayonnements ionisants, à assurer la sûreté des sources de rayonnements et à protéger l'environnement sont définies dans la publication de l'AIEA intitulée « Radioprotection et sûreté des sources de rayonnements : Normes fondamentales internationales de sûreté » (n° GSR Part 3 de la collection Normes de sûreté de l'AIEA), établie sous les auspices de l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN/OCDE), de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), de la Commission européenne, de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), de l'Organisation internationale du Travail (OIT), de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS), de l'Organisation panaméricaine de la Santé (OPS) et du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE).

Le présent Guide de sûreté donne des recommandations et conseils visant à faciliter le respect des prescriptions figurant dans la publication n° GSR Part 3 relatives à la protection du public contre les risques liés à une exposition due à des sources naturelles de rayonnements ionisants dans un environnement intérieur. Ces recommandations et conseils sont fournis en application des prescriptions relatives à la justification et à l'optimisation de la protection que doivent assurer les autorités nationales qui envisagent de gérer les risques liés à une exposition due à des sources naturelles de rayonnements dans un environnement intérieur, comme le radon et les radionucléides d'origine naturelle que renferment les matériaux de construction. Le Guide contient également des recommandations et conseils concernant la mise en place par les États de plans d'action nationaux ayant pour but de gérer les risques liés à une exposition du public due au radon dans un environnement intérieur.

Ce Guide est établi sous les auspices de l'AIEA et de l'OMS. L'AIEA remercie les experts de différents États et de l'OMS qui ont contribué à la rédaction et à la révision du texte.

LES NORMES DE SÛRETÉ DE L'AIEA

CONTEXTE

La radioactivité est un phénomène naturel et des sources naturelles de rayonnements sont présentes dans l'environnement. Les rayonnements et les substances radioactives ont de nombreuses applications utiles, allant de la production d'électricité aux applications médicales, industrielles et agricoles. Les risques radiologiques pour les travailleurs, le public et l'environnement pouvant découler de ces applications doivent être évalués et, le cas échéant, contrôlés.

Des activités telles que les utilisations médicales des rayonnements, l'exploitation des installations nucléaires, la production, le transport et l'utilisation de matières radioactives, et la gestion de déchets radioactifs doivent donc être soumises à des normes de sûreté.

La réglementation de la sûreté est une responsabilité nationale. Cependant, les risques radiologiques peuvent dépasser les frontières nationales, et la coopération internationale sert à promouvoir et à renforcer la sûreté au niveau mondial par l'échange de données d'expérience et l'amélioration des capacités de contrôle des risques afin de prévenir les accidents, d'intervenir dans les cas d'urgence et d'atténuer toute conséquence dommageable.

Les États ont une obligation de diligence et un devoir de précaution, et doivent en outre remplir leurs obligations et leurs engagements nationaux et internationaux.

Les normes de sûreté internationales aident les États à s'acquitter de leurs obligations en vertu de principes généraux du droit international, tels que ceux ayant trait à la protection de l'environnement. Elles servent aussi à promouvoir et à garantir la confiance dans la sûreté, ainsi qu'à faciliter le commerce international.

Le régime mondial de sûreté nucléaire fait l'objet d'améliorations continues. Les normes de sûreté de l'AIEA, qui soutiennent la mise en œuvre des instruments internationaux contraignants et les infrastructures nationales de sûreté, sont une pierre angulaire de ce régime mondial. Elles constituent un outil que les parties contractantes peuvent utiliser pour évaluer leur performance dans le cadre de ces conventions internationales.

LES NORMES DE SÛRETÉ DE L'AIEA

Le rôle des normes de sûreté de l'AIEA découle du Statut, qui autorise l'AIEA à établir ou adopter, en consultation et, le cas échéant, en collaboration

avec les organes compétents des Nations Unies et avec les institutions spécialisées intéressées, des normes de sûreté destinées à protéger la santé et à réduire au minimum les dangers auxquels sont exposés les personnes et les biens, et à prendre des dispositions pour l'application de ces normes.

Afin d'assurer la protection des personnes et de l'environnement contre les effets dommageables des rayonnements ionisants, les normes de sûreté de l'AIEA établissent des principes de sûreté fondamentaux, des prescriptions et des mesures pour contrôler l'exposition des personnes et le rejet de matières radioactives dans l'environnement, pour restreindre la probabilité d'événements qui pourraient entraîner la perte du contrôle du cœur d'un réacteur nucléaire, et pour atténuer les conséquences de tels événements s'ils se produisent. Les normes s'appliquent aux installations et aux activités qui donnent lieu à des risques radiologiques, y compris les installations nucléaires, à l'utilisation des rayonnements et des sources radioactives, au transport des matières radioactives et à la gestion des déchets radioactifs.

Les mesures de sûreté et les mesures de sécurité¹ ont comme objectif commun de protéger la vie et la santé humaines et l'environnement. Ces mesures doivent être conçues et mises en œuvre de manière intégrée de sorte que les mesures de sécurité ne portent pas préjudice à la sûreté et que les mesures de sûreté ne portent pas préjudice à la sécurité.

Les normes de sûreté de l'AIEA sont l'expression d'un consensus international sur ce qui constitue un degré élevé de sûreté pour la protection des personnes et de l'environnement contre les effets dommageables des rayonnements ionisants. Elles sont publiées dans la collection Normes de sûreté de l'AIEA, qui est constituée de trois catégories (voir la figure 1).

Fondements de sûreté

Les fondements de sûreté présentent les objectifs et les principes de protection et de sûreté qui constituent la base des prescriptions de sûreté.

Prescriptions de sûreté

Un ensemble intégré et cohérent de prescriptions de sûreté établit les prescriptions qui doivent être respectées pour assurer la protection des personnes et de l'environnement, actuellement et à l'avenir. Les prescriptions sont régies par l'objectif et les principes énoncés dans les Fondements de sûreté. S'il n'y est pas satisfait, des mesures doivent être prises pour atteindre ou rétablir le niveau de sûreté requis. La présentation et le style des prescriptions facilitent leur utilisation pour l'établissement, de manière harmonisée, d'un cadre

¹ Voir aussi les publications parues dans la collection Sécurité nucléaire de l'AIEA.

Principes fondamentaux de sûreté Prescriptions de sûreté générales Prescriptions de sûreté particulières Partie 1. Cadre gouvernemental, législatif 1. Évaluation des sites d'installations et réglementaire pour la sûreté nucléaires Partie 2. Direction et gestion pour la sûreté 2. Sûreté des centrales nucléaires 2/1. Conception Partie 3. Radioprotection et sûreté des 2/2. Mise en service et exploitation sources de rayonnements Partie 4. Évaluation de la sûreté pour les 3. Sûreté des réacteurs de recherche installations et les activités Partie 5. Gestion des déchets radioactifs 4. Sûreté des installations du cycle du avant stockage définitif combustible nucléaire Partie 6. Déclassement et cessation des 5. Sûreté des installations de stockage de activités déchets radioactifs Partie 7. Préparation et conduite des 6. Sûreté du transport des matières interventions d'urgence radioactives Collection des guides de sûreté

Fondements de sûreté

FIG. 1. Structure à long terme de la collection Normes de sûreté de l'AIEA.

réglementaire national. Ces prescriptions, notamment les prescriptions globales numérotées, sont énoncées au présent de l'indicatif. De nombreuses prescriptions ne s'adressent pas à une partie en particulier, ce qui signifie que la responsabilité de leur application revient à toutes les parties concernées.

Guides de sûreté

Les guides de sûreté contiennent des recommandations et des orientations sur la façon de se conformer aux prescriptions de sûreté, traduisant un consensus international selon lequel il est nécessaire de prendre les mesures recommandées (ou des mesures équivalentes). Ils présentent les bonnes pratiques internationales et reflètent de plus en plus les meilleures d'entre elles pour aider les utilisateurs à atteindre des niveaux de sûreté élevés. Les recommandations qu'ils contiennent sont énoncées au conditionnel

APPLICATION DES NORMES DE SÛRETÉ DE L'AIEA

Les principaux utilisateurs des normes de sûreté dans les États Membres de l'AIEA sont les organismes de réglementation et d'autres autorités nationales pertinentes. Les normes de sûreté de l'AIEA sont aussi utilisées par les organisations parrainantes et par de nombreux organismes qui conçoivent, construisent et exploitent des installations nucléaires, ainsi que par les utilisateurs de rayonnements et de sources radioactives.

Les normes de sûreté de l'AIEA sont applicables, selon que de besoin, pendant la durée de vie de toutes les installations et activités, existantes et nouvelles, utilisées à des fins pacifiques ainsi qu'aux mesures de protection visant à réduire les risques radiologiques existants. Les États peuvent les utiliser comme référence pour la réglementation nationale concernant les installations et les activités.

En vertu de son Statut, l'AIEA est tenue d'appliquer les normes de sûreté à ses propres opérations et les États doivent les appliquer aux opérations pour lesquelles l'AIEA fournit une assistance.

Les normes de sûreté sont aussi utilisées par l'AIEA comme référence pour ses services d'examen de la sûreté, ainsi que pour le développement des compétences, y compris l'élaboration de programmes de formation théorique et de cours pratiques.

Les conventions internationales contiennent des prescriptions semblables à celles des normes de sûreté qui sont juridiquement contraignantes pour les parties contractantes. Les normes de sûreté de l'AIEA, complétées par les conventions internationales, les normes industrielles et les prescriptions nationales détaillées, constituent une base cohérente pour la protection des personnes et de l'environnement. Il y a aussi des aspects particuliers de la sûreté qui doivent être évalués à l'échelle nationale. Par exemple, de nombreuses normes de sûreté de l'AIEA, en particulier celles portant sur les aspects de la sûreté relatifs à la planification ou à la conception, sont surtout applicables aux installations et activités nouvelles. Les prescriptions établies dans les normes de sûreté de l'AIEA peuvent n'être pas pleinement satisfaites par certaines installations existantes construites selon des normes antérieures. Il revient à chaque État de déterminer le mode d'application des normes de sûreté de l'AIEA dans le cas de telles installations.

Les considérations scientifiques qui sous-tendent les normes de sûreté de l'AIEA constituent une base objective pour les décisions concernant la sûreté ; cependant, les décideurs doivent également juger en connaissance de cause et déterminer la meilleure manière d'équilibrer les avantages d'une mesure ou d'une activité par rapport aux risques radiologiques et autres qui y sont associés ainsi qu'à tout autre impact négatif qui en découle.

PROCESSUS D'ÉLABORATION DES NORMES DE SÛRETÉ DE L'AIEA

La préparation et l'examen des normes de sûreté sont l'œuvre commune du Secrétariat de l'AIEA et de cinq comités – le Comité des normes de préparation et de conduite des interventions d'urgence (EPReSC), le Comité des normes de sûreté nucléaire (NUSSC), le Comité des normes de sûreté radiologique (RASSC), le Comité des normes de sûreté du transport (TRANSSC) – et de la Commission des normes de sûreté (CSS), qui supervise tout le programme des normes de sûreté (voir la figure 2).

Tous les États Membres de l'AIEA peuvent nommer des experts pour siéger dans ces comités et présenter des observations sur les projets de normes. Les membres de la Commission des normes de sûreté sont nommés par le

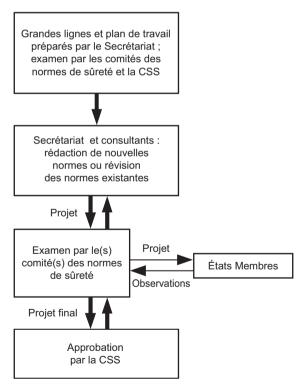


FIG. 2. Processus d'élaboration d'une nouvelle norme de sûreté ou de révision d'une norme existante.

Directeur général et comprennent des responsables de la normalisation au niveau national.

Un système de gestion a été mis en place pour la planification, l'élaboration, le réexamen, la révision et l'établissement des normes de sûreté de l'AIEA. Il structure le mandat de l'AIEA, la vision de l'application future des normes, politiques et stratégies de sûreté, et les fonctions et responsabilités correspondantes.

INTERACTION AVEC D'AUTRES ORGANISATIONS INTERNATIONALES

Les conclusions du Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR) et les recommandations d'organismes internationaux spécialisés, notamment de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR), sont prises en compte lors de l'élaboration des normes de sûreté de l'AIEA. Certaines normes de sûreté sont élaborées en collaboration avec d'autres organismes des Nations Unies ou d'autres organisations spécialisées, dont l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire, l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, l'Organisation internationale du Travail, l'Organisation mondiale de la santé, l'Organisation panaméricaine de la santé et le Programme des Nations Unies pour l'environnement.

INTERPRÉTATION DU TEXTE

Les termes relatifs à la sûreté et à la sécurité nucléaires ont le sens donné dans le glossaire de l'AIEA sur la sûreté et la sécurité nucléaires (voir https://www.iaea.org/resources/publications/iaea-nuclear-safety-and-security-glossary). L'orthographe et le sens des autres mots sont conformes à la dernière édition du Concise Oxford Dictionary. Pour les guides de sûreté, c'est la version anglaise qui fait foi.

Le contexte de chaque volume de la collection Normes de sûreté de l'AIEA et son objectif, sa portée et sa structure sont expliqués dans le chapitre premier (introduction) de chaque publication.

Les informations qui ne trouvent pas leur place dans le corps du texte (par exemple celles qui sont subsidiaires ou séparées du corps du texte, sont incluses pour compléter des passages du texte principal ou décrivent des méthodes de calcul, des procédures ou des limites et conditions) peuvent être présentées dans des appendices ou des annexes.

Lorsqu'une norme comporte un appendice, celui-ci est réputé faire partie intégrante de la norme. Les informations données dans un appendice ont le même statut que le corps du texte et l'AIEA en assume la paternité. Les annexes et notes de bas de page du texte principal ont pour objet de donner des exemples concrets ou des précisions ou explications. Elles ne sont pas considérées comme faisant partie intégrante du texte principal. Les informations contenues dans les annexes n'ont pas nécessairement l'AIEA pour auteur ; les informations publiées par d'autres auteurs figurant dans des normes de sûreté peuvent être présentées dans des annexes. Les informations provenant de sources extérieures présentées dans les annexes sont adaptées pour être d'utilité générale.

TABLE DES MATIÈRES

1.	INTRODUCTION	1
	Contexte (1.1–1.8). Objectif (1.9). Champ d'application (1.10–1.11). Structure (1.12–1.13).	1 3 3 5
2.	POLITIQUE NATIONALE ET RÔLE DE L'AUTORITÉ NATIONALE (2.1–2.9)	6
3.	CONTRÔLE DE L'EXPOSITION DUE AU RADON DANS UN ENVIRONNEMENT INTÉRIEUR	9
	Généralités (3.1–3.2). Exposition due au 222Rn. Origine et concentrations de 222Rn dans un environnement intérieur (3.3–3.12). Diffusion d'informations sur le radon (3.13–3.17) Études sur la présence de radon dans un environnement intérieur (3.18–3.22). Plan d'action sur le radon (3.23–3.59). Exposition due au 220Rn. Origine et concentrations de 220Rn dans un environnement intérieur (3.60–3.61). Études sur la présence de 220Rn dans un environnement intérieur (3.62–3.64). Contrôle et atténuation de l'exposition due	9 9 9 12 14 16 28 28
4.	au ²²⁰ Rn (3.65–3.67)	30
••	GAMMA DANS UN ENVIRONNEMENT INTÉRIEUR	30
	Sources naturelles de rayonnements gamma (4.1–4.9)	30 32 33

Contrôle et atténuation de l'exposition due aux rayonnements	
gamma	34
Rayonnements gamma provenant des sols (4.15–4.16)	34
Rayonnements gamma provenant de matériaux de	
construction (4.17–4.27)	34
Rayonnements gamma provenant de matériaux de	
construction présents dans des bâtiments	
existants (4.28–4.30)	38
RÉFÉRENCES	41
ANNEXE I : ÉTUDES SUR LE RADON ET CARTOGRAPHIE	
DES ZONES SUJETTES AU ²²² Rn	45
ANNEXE II: TECHNIQUES DE MESURE DU ²²² Rn ET DU ²²⁰ Rn	54
ANNEXE III : MESURES PRÉVENTIVES VISANT À RÉDUIRE	
LES CONCENTRATIONS DE ²²² RN DANS LES	
LOGEMENTS NEUFS ET AUTRES BÂTIMENTS	
NOUVELLEMENT CONSTRUITS	68
ANNEXE IV : ACTIONS CORRECTIVES VISANT À FAIRE	
BAISSER LES CONCENTRATIONS DE ²²² RN	
DANS LES LOGEMENTS ET AUTRES	
BÂTIMENTS EXISTANTS	74
ANNEXE V: CAMPAGNES D'INFORMATION DU PUBLIC	
SUR LES RISQUES IMPUTABLES AU RADON	82
ANNEXE VI: APPLICATION DES ALGORITHMES DE	
VÉRIFICATION DE LA CONFORMITÉ DES	
MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION	87
PERSONNES AYANT CONTRIBUÉ À LA RÉDACTION	
ET À L'EXAMEN DU TEXTE	103

1. INTRODUCTION

CONTEXTE

- 1.1. La publication intitulée Principes fondamentaux de sûreté consacrée aux Fondements de sûreté [1] énonce l'objectif et les principes de sûreté en matière de protection des personnes et de l'environnement contre les effets nocifs des rayonnements ionisants. Le principe 10, aux termes duquel « [1]es actions protectrices visant à réduire les risques radiologiques existants ou non réglementés doivent être justifiées et optimisées » couvre, entre autres types de situations, l'exposition due à des sources naturelles de rayonnements, dont celle imputable au radon¹, dans les habitations et lieux de travail, ainsi que l'exposition aux rayons gamma externes due aux radionucléides d'origine naturelle présents dans les matériaux de construction.
- 1.2. La publication parue dans la catégorie Prescriptions de sûreté de l'AIEA et intitulée Radioprotection et sûreté des sources de rayonnements : Normes fondamentales internationales de sûreté (GSR Part 3) [2] énonce les prescriptions à suivre pour assurer la protection des personnes contre l'exposition aux rayonnements ionisants (ci-après, « les rayonnements ») et la sûreté des sources de rayonnements. Les prescriptions énoncées dans la publication n° GSR Part 3 de la collection Normes de sûreté de l'AIEA, qui s'appuient sur les informations relatives aux effets néfastes attribués à l'exposition aux rayonnements fournies par le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR) [3] ainsi que sur les recommandations de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) [4], sont destinées à servir de base à la réglementation en matière de radioprotection.
- 1.3. La protection du public, telle que le prévoit le document GSR Part 3, a toujours fait partie des prescriptions relatives à la radioprotection. Pour autant, les recommandations portant plus particulièrement sur la protection du public contre l'exposition due à des sources naturelles de rayonnements sont assez peu nombreuses. Le présent Guide de sûreté vise à combler cette lacune, en ce qu'il est principalement consacré à la détermination et à la mise en œuvre de mesures appropriées destinées à protéger le public contre les risques liés à une exposition, dans un environnement intérieur, imputable à des sources naturelles

 $^{^1\,}$ Tout comme dans la publication GSR Part 3, le terme « radon » désigne dans le présent Guide de sûreté toute combinaison des deux principaux isotopes de l'élément radon (^{222}Rn et ^{220}Rn).

de rayonnements. L'exposition subie à l'intérieur de bâtiments est généralement plus élevée qu'une exposition extérieure ; en revanche, elle est plus facilement maîtrisable.

- 1.4. La CIPR considère, dans sa publication 103 [4], que l'exposition du public due à la présence de radon à l'intérieur de bâtiments doit faire l'objet de recommandations quant à l'application des prescriptions en matière de radioprotection. Dans sa publication 65 [5], elle indique les niveaux d'action qu'elle préconise dans les habitations existantes, les nouveaux logements et les lieux de travail en surface et souterrains, et formule des recommandations concernant la détermination des zones sujettes au radon et l'application de mesures préventives et d'actions correctives. Dans sa déclaration sur le radon publiée en 2009 [6], elle suggère qu'une dose effective de l'ordre de 10 mSv de ²²²Rn par an constitue un niveau auquel il serait très certainement justifié d'intervenir pour réduire l'exposition. S'appuyant sur les nouvelles conclusions auxquelles elle est ainsi parvenue, la CIPR a ramené la valeur supérieure du niveau de référence pour le gaz radon présent dans les habitations de 600 Bq/m³-valeur proposée dans ses recommandations de 2007 à 300 Bq/m³.
- 1.5. L'Organisation mondiale de la Santé (OMS) s'est intéressée à l'exposition du public due au ²²²Rn dans un environnement intérieur [7] en abordant la question sous l'angle de la santé publique ; elle a ainsi fait écho aux données épidémiologiques démontrant que cette exposition était responsable d'un nombre important de cancers du poumon au sein de la population générale. Le manuel qu'y consacre l'OMS, intitulé Handbook on Indoor Radon, renferme des recommandations détaillées relatives à la réduction des risques sanitaires imputables au ²²²Rn et met en avant différentes solutions possibles pour prévenir et réduire les expositions au ²²²Rn. L'OMS propose de fixer à 100 Bq/m³ le niveau de référence afin de limiter au minimum les risques sanitaires liés à une exposition due au ²²²Rn dans un environnement intérieur, ajoutant que « si ce niveau ne peut être atteint en raison de conditions propres au pays concerné, le niveau de référence choisi ne devrait pas dépasser 300 Bg/m³ ».
- 1.6. Dans sa publication 82 [8], la CIPR traite de l'exposition due aux radionucléides émetteurs gamma d'origine naturelle qui sont présents dans les matériaux de construction et dans le sol. Elle recommande un niveau de dose de référence d'environ 1 mSv pour un type de produits d'utilisation courante sur lesquels il est possible d'intervenir certains matériaux de construction, par exemple et qui pourraient, dans certaines circonstances, être une cause majeure d'exposition prolongée. Elle invite les instances nationales concernées et, le cas échéant, les organisations internationales compétentes, à fixer des niveaux de

référence pour des produits de base, en particulier pour certains matériaux de construction.

- 1.7. L'exposition du public due aux radionucléides d'origine naturelle présents dans les aliments est généralement faible et ne se prête guère à des contrôles. En cas de hausse de la concentration de radionucléides d'origine naturelle dans les denrées alimentaires consécutive, par exemple, à des rejets provenant de l'exploitation d'une installation ou d'une activité, il convient d'appliquer les prescriptions relatives aux situations d'exposition planifiée. Des limites indicatives concernant les radionucléides que contiennent des denrées alimentaires faisant l'objet d'un commerce international et destinées à la consommation humaine ont été publiées par la Commission mixte FAO/OMS du Codex Alimentarius [9], pour ce qui est des aliments susceptibles d'avoir été contaminés à la suite d'une situation d'urgence nucléaire ou radiologique.
- 1.8. La présence de radionucléides d'origine naturelle dans l'eau de boisson a été prise en compte par l'OMS dans la dernière révision de ses directives sur la qualité de l'eau de boisson [10]. L'Organisation a défini les grandes lignes d'une approche visant à contrôler l'ingestion de radionucléides d'origine naturelle et de radionucléides d'origine artificielle dans l'eau de boisson, qui ferait appel à des niveaux de dépistage. Elle propose également une méthode destinée à contrôler l'inhalation du radon libéré par l'eau potable dans l'air ambiant intérieur.

OBJECTIF

1.9. Le présent Guide de sûreté formule des recommandations relatives au respect des prescriptions énoncées dans le doc. de réf. [2] concernant l'exposition du public due à des sources naturelles de rayonnements dans un environnement intérieur. Il donne également des indications qui ont trait à l'application des prescriptions relatives à la justification et à l'optimisation de la protection que doivent assurer les autorités nationales appelées à contrôler les sources naturelles de rayonnements, comme le radon présent à l'intérieur des bâtiments et les radionucléides d'origine naturelle que renferment les matériaux de construction.

CHAMP D'APPLICATION

1.10. Le présent Guide de sûreté traite de l'exposition du public due aux sources naturelles de rayonnements dans un environnement intérieur. Il donne des recommandations et conseils que l'organisme de réglementation et toute autre

instance investie de responsabilités en matière d'exposition aux rayonnements provenant de sources naturelles (ci-après désignés sous le vocable « autorité nationale » et définis au paragraphe 2.3) sont invités à suivre pour se conformer aux prescriptions énoncées dans le doc. de réf. [2]. Ces recommandations et conseils portent plus précisément sur :

- a) l'exposition du public due au ²²²Rn présent dans les habitations et autres bâtiments à fort taux d'occupation, en ce compris les jardins d'enfants, les établissements scolaires et les hôpitaux. Devront ici être pris en considération les taux d'occupation totale élevés (doc. de réf. [1], par. 3.23) ainsi que les facteurs favorisant des taux d'occupation élevés. Les voies d'exposition envisagées sont la pénétration de ²²²Rn provenant du sol, le ²²²Rn libéré par les matériaux de construction de l'habitation et le ²²²Rn introduit dans l'habitation via le système d'adduction d'eau ;
- b) l'exposition du public due au ²²⁰Rn présent dans les habitations. Les voies d'exposition envisagées sont le ²²⁰Rn libéré par le sol et le ²²⁰Rn libéré par les matériaux de construction de l'habitation. Le ²²⁰Rn introduit par le système d'adduction d'eau constitue rarement une importante source d'exposition aux rayonnements;
- c) l'exposition du public aux rayons gamma externes provenant de radionucléides d'origine naturelle présents dans le sol et dans les matériaux de construction. Les « matériaux de construction » sont ceux qui ont été utilisés pour la construction de bâtiments tels que des logements, des bureaux, des locaux industriels et autres lieux de travail.

1.11. Ce Guide de sûreté n'aborde pas :

- a) l'exposition due au ⁴⁰K présent dans le corps humain, ni celle due au rayonnement cosmique à la surface de la terre, qui sont considérées comme non maîtrisables et, partant, exclues du champ d'application du doc. de réf. [2] (voir doc. de réf. [2], par. 1.42, note de bas de page 7);
- b) l'exposition professionnelle des travailleurs due à des sources naturelles de rayonnements {voir doc. de réf. [2], par. 3.4 a)}. L'exposition professionnelle au ²²²Rn et au ²²⁰Rn peut être observée sur des lieux de travail tels que des bureaux et des usines. La gestion de ce type exposition est évoquée dans le présent Guide de sûreté, mais des recommandations et conseils en la matière figureront dans un Guide de sûreté consacré à la radioprotection professionnelle, qui est en cours d'élaboration [11];
- c) l'exposition du public due aux rejets et celle due à la gestion de déchets radioactifs provenant de sources naturelles {voir doc. de réf. [2], par. 3.4 b)}. Ces expositions doivent être couvertes par les guides de sûreté consacrés au

- contrôle réglementaire des rejets radioactifs dans l'environnement [12] et à la gestion des résidus radioactifs provenant de l'exploitation minière, du traitement des minerais et autres activités liées aux matières radioactives naturelles [13];
- d) l'exposition du public au rayonnement cosmique lors de voyages en avion. Réputé non maîtrisable, ce phénomène n'entre dans le champ d'application ni du doc. de réf. [2], ni du présent Guide de sûreté;
- e) l'exposition du public due aux radionucléides d'origine naturelle présents dans les denrées alimentaires et l'eau potable ;
- f) l'exposition due au radon dans les lieux de travail recevant peu de public, comme les bureaux et les usines. Le grand public qui se rend dans des grottes accessibles dans le cadre de visites guidées ne devrait être que brièvement exposé au radon, de sorte qu'aucun contrôle ne sera nécessaire;
- g) l'exposition du public due aux radionucléides d'origine naturelle présents dans les matériaux entrant dans la construction d'éléments d'infrastructure de l'environnement bâti tels que les routes, les ponts, les barrages et les défenses maritimes. Ces éléments n'occasionnent pas d'exposition significative du public, étant donné sa brièveté.

STRUCTURE

- 1.12. La section 2 contient des recommandations et conseils concernant le cadre gouvernemental, législatif et réglementaire relatif à l'élaboration des politiques dans ce domaine et le rôle de l'autorité nationale. La section 3 donne un aperçu des expositions dues au ²²²Rn et au ²²⁰Rn, et contient des recommandations et conseils quant aux approches à suivre pour les gérer. La section 4 renferme des recommandations et conseils portant sur l'approche réglementaire qu'il convient de respecter s'agissant de l'exposition aux rayons gamma émis par les matériaux de construction.
- 1.13. Six annexes apportent des informations et conseils supplémentaires, qui s'intéressent plus particulièrement au radon en tant que principal facteur d'exposition due aux sources naturelles de rayonnements. L'annexe I indique comment réaliser des études sur le radon présent dans un environnement intérieur. L'annexe II traite des techniques de mesure du radon. L'annexe III dispense des conseils sur les techniques de construction permettant d'éviter l'accumulation de radon dans les habitations et autres bâtiments nouvellement construits. L'annexe IV porte sur les mesures correctives propres à réduire les concentrations élevées de radon dans les habitations et autres bâtiments existants. L'annexe V donne un aperçu des programmes d'information destinés à faire prendre

conscience au public des risques associés au radon. L'annexe VI comporte des exemples d'application d'algorithmes utilisés pour contrôler l'exposition, dans un environnement intérieur, due aux rayons gamma provenant de radionucléides d'origine naturelle présents dans les matériaux de construction.

2. POLITIQUE NATIONALE ET RÔLE DE L'AUTORITÉ NATIONALE

- 2.1. Le document cité en référence [14] exige que « [1]e gouvernement établi[sse] un système efficace d'actions protectrices, conformes aux principes de justification et d'optimisation, pour réduire les risques radiologiques indus associés aux sources non réglementées (d'origine naturelle et artificielle) et la contamination résultant d'activités ou d'événements passés » (prescription 9 du doc. de réf. [14]). Ces sources non réglementées d'origine naturelle englobent le ²²²Rn et le ²²⁰Rn présents dans les habitations et autres bâtiments à fort taux d'occupation, ainsi que les radionucléides d'origine naturelle présents dans les matériaux de construction.
- 2.2. Le document cité en référence [2] exige que « [1]e gouvernement veille à ce que les situations d'exposition existante qui ont été identifiées soient évaluées en vue de déterminer les expositions professionnelles et les expositions du public qui sont préoccupantes du point de vue de la radioprotection » (prescription 47 du doc. de réf. [2]). En pareilles situations, le gouvernement est tenu de s'assurer que les responsabilités en matière de protection et de sûreté ont été assignées et que des niveaux de référence appropriés ont été fixés (par. 5.2 du doc. de réf. [2]).
- 2.3. La mise en œuvre d'un programme efficace de protection du public contre l'exposition due aux sources naturelles de rayonnements dans un environnement intérieur pourrait concerner différentes instances. Dans le présent Guide de sûreté, l'expression « autorité nationale » désigne collectivement l'organisme de réglementation et autres autorités ou instances ayant des responsabilités en matière d'exposition aux rayonnements provenant de sources naturelles. Au nombre de ces instances figurent, sans que cette liste soit limitative, les organismes qui interviennent dans la politique de radioprotection et de santé publique, les entités du secteur public et du secteur privé spécialisées dans le mesurage des rayonnements, et les organes chargés de la définition et de l'application de normes de construction. En principe, l'organisation faîtière devra être celle qui est responsable de la radioprotection.

- 2.4. L'autorité nationale devra procéder à une évaluation pour déterminer si l'exposition, dans un environnement intérieur, due à des sources naturelles de rayonnements telles que le ²²²Rn, le ²²⁰Rn et les rayons gamma nécessite l'élaboration de stratégies visant à déployer des mesures de radioprotection pour atténuer l'exposition.
- 2.5. Une fois cette évaluation réalisée, il conviendra, si une intervention supplémentaire s'avère nécessaire, de définir une politique détaillée qui puisse assurer une protection optimale du public contre l'exposition due aux sources naturelles de rayonnements à l'intérieur des bâtiments.
- 2.6. L'autorité nationale est tenue de veiller à ce que la stratégie de protection destinée à préserver le public d'une exposition due aux sources naturelles de rayonnements dans un environnement intérieur soit proportionnée aux risques de rayonnement associés à ces sources. Elle devra également veiller à ce que les mesures de protection à mettre en place présentent des avantages suffisants pour compenser les inconvénients associés à leur exécution, y compris ceux revêtant la forme de risques radiologiques il lui faudra, en d'autres termes, s'assurer que les mesures de protection soient justifiées (par. 5.7 du doc. de réf. [2]). L'autorité nationale est également tenue de veiller à ce que la forme, l'ampleur et la durée de ces mesures de protection soient optimisées (par. 5.8 du doc. de réf. [2]).
- 2.7. En général, l'exposition de la population due à des sources naturelles de rayonnements dans un environnement intérieur a pour élément dominant le ²²²Rn. Il appartiendra à l'autorité nationale de déterminer l'ampleur de cette exposition et de procéder pour ce faire à des études nationales et régionales en s'appuyant sur des normes nationales et internationales qui précisent les méthodes de test permettant d'établir la présence de ²²²Rn [15]. Ces études serviront également à déterminer quelles sont les zones qui affichent des concentrations de ²²²Rn supérieures à la moyenne elles sont souvent appelées « zones sujettes au ²²²Rn » (voir paragraphes 3.42 à 3.45). Les études portant sur l'exposition au ²²⁰Rn (voir paragraphes 3.62 à 3.64) et celles relatives à l'exposition aux rayons gamma provenant des matériaux de construction (voir section 4) pourront se révéler utiles dans certaines circonstances.
- 2.8. Si les résultats obtenus à l'issue des recommandations formulées au par. 2.7 montrent qu'il y aurait lieu de le faire, l'autorité nationale devra :

- a) fixer des niveaux de référence concernant le ²²²Rn et, le cas échéant, le ²²⁰Rn pour les habitations² (voir paragraphes 3.35 à 3.40 et 3.65);
- fixer des normes nationales de concentrations de radionucléides d'origine naturelle dans les matériaux de construction, sur la base des niveaux de concentration d'activité spécifiés dans le doc. GSR Part 3 [2] (voir section 4);
- c) établir des programmes de mesurage permettant de répertorier les habitations et autres bâtiments existants à forts taux d'occupation du public qui présentent des concentrations de radon excédant les niveaux de référence;
- d) établir un programme visant à identifier les matériaux de construction susceptibles d'entraîner une exposition du public supérieure à leur niveau de référence;
- e) définir et mettre en place un cadre permettant de réduire l'exposition due au ²²²Rn et au ²²⁰Rn dans les habitations existantes et les logements nouvellement construits ainsi que dans les autres bâtiments à forts taux d'occupation du public (voir les paragraphes 3.23 à 3.59 et 3.65 à 3.67) et d'effectuer des contrôles concernant les radionucléides propres aux matériaux de construction (voir les paragraphes 4.17 à 4.27). Ce cadre devra offrir la possibilité de déterminer dans quelle mesure les programmes de réduction des concentrations de ²²²Rn et de ²²⁰Rn dans un environnement intérieur portent leurs fruits, et de procéder à des évaluations économiques tenant compte de l'ensemble des coûts associés à ces programmes.
- 2.9. L'autorité nationale pourra être amenée, dans certaines situations, à voir s'il serait judicieux d'instaurer une réglementation pour contrôler ou limiter l'exposition due aux sources naturelles de rayonnements dans un environnement intérieur. On trouvera dans les sections 3 et 4 ci-après des recommandations et conseils quant à la conduite à tenir face à de telles situations. La décision de l'autorité nationale concernant la nécessité d'une réglementation devra tenir compte des conséquences socio-économiques qui en résulteraient et des difficultés que pourrait poser sa mise en application. Qui plus est, les prescriptions en matière d'optimisation ne sauraient être ignorées.

² Le niveau de référence fixé pour les habitations vaut aussi pour les autres bâtiments qui reçoivent un public nombreux.

3. CONTRÔLE DE L'EXPOSITION DUE AU RADON DANS UN ENVIRONNEMENT INTÉRIEUR

GÉNÉRALITÉS

- 3.1. Trois isotopes radioactifs du radon sont présents à l'état naturel en quantités importantes : le ²²²Rn, le ²²⁰Rn et le ²¹⁹Rn. Le radon 222 a une période radioactive de 3,82 jours et est issu de la chaîne de désintégration naturelle de l'²³⁸U. Le radon 220 a une période radioactive de 55,6 secondes et est issu de la chaîne de désintégration naturelle du ²³²Th. Le radon 219 a une période radioactive de 3,96 secondes et est issu de la chaîne de désintégration naturelle de l'²³⁵U. En raison de sa courte période radioactive et des concentrations généralement faibles d'²³⁵U dans les sols, la dose due à l'exposition au ²¹⁹Rn est négligeable et n'est en rien préoccupante sur le plan radiologique.
- 3.2. Les radionucléides à l'origine du ²²²Rn et du ²²⁰Rn peuvent être naturellement présents dans l'environnement et/ou résulter d'activités antérieures. Ces différentes causes d'exposition ne donnent lieu à aucune distinction pour ce qui est de la protection à offrir. Cependant, lorsqu'il s'avère nécessaire d'agir pour atténuer l'exposition, plusieurs approches doivent être envisagées, en fonction de la voie d'exposition.

EXPOSITION DUE AU 222RN

Origine et concentrations de ²²²Rn dans un environnement intérieur

- 3.3. Le radon 222 représente potentiellement la source la plus importante d'exposition aux rayonnements dans un environnement intérieur, car sa période radioactive est suffisamment longue pour lui permettre de s'y accumuler et parce que l'²³⁸U peut se trouver en concentrations relativement élevées dans le sol. Le sol libère en permanence du radon 222 du fait de la désintégration radioactive du ²²⁶Ra. Lorsque le ²²²Rn est libéré dans l'air, il se dilue rapidement jusqu'à atteindre des concentrations inoffensives. Le plus souvent, les concentrations de ²²²Rn en extérieur sont de 10 Bq/m³ [16], mais une fourchette de concentrations moyennes à long terme allant de 1 Bq/m³ à plus de 100 Bq/m³ a été signalée [17].
- 3.4. Dans la grande majorité des cas, le ²²²Rn présent dans un bâtiment provient du sol sur lequel il repose. Les matériaux de construction peuvent également être à l'origine de la présence de ²²²Rn dans un environnement intérieur, mais

généralement à bien moindre échelle. Dans certains cas, le ²²²Rn pénètre à l'intérieur via le système d'adduction d'eau et est libéré lorsque l'eau coule³.

3.5. Dans la plupart des bâtiments, la pression de l'air au niveau du sol est légèrement inférieure à celle de l'air extérieur, car l'air intérieur est généralement plus chaud. L'air se répand ainsi du sol dans les bâtiments, entraînant avec lui le ²²²Rn. Il s'infiltre principalement par des interstices entre le sol et les murs, des fissures dans le sol et les espaces vides des canalisations et des câbles (voir Fig. 1). Les niveaux de ²²²Rn à l'intérieur des bâtiments varient selon les saisons, au gré des variations de la température extérieure moyenne - en d'autres termes, les niveaux de ²²²Rn observés en hiver sont d'ordinaire supérieurs aux niveaux relevés en été.

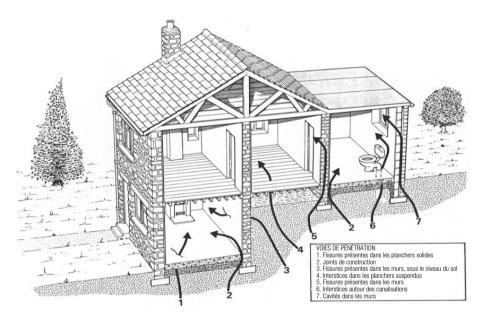


FIG. 1. Voies d'accès du radon [image reproduite avec l'aimable autorisation du Building Research Establishment (BRE), Royaume-Uni].

³ Les critères de gestion des risques liés à l'exposition due au radon dans l'eau de boisson sont énoncés dans la section 9 des Directives de qualité pour l'eau de boisson de l'OMS [10].

- 3.6. La distribution des concentrations de ²²²Rn à l'intérieur des habitations est très large et il n'est pas rare qu'elle couvre plusieurs ordres de grandeur. À l'échelle d'un État ou d'une région, elle est souvent log-normale ou proche de la log-normalité. Il arrive parfois que des habitations affichent des concentrations de ²²²Rn à ce point élevées que les doses de rayonnements reçues par leurs occupants dépassent largement les limites de dose annuelle admises dans le cadre d'une exposition professionnelle.
- 3.7. Exprimée en moyenne arithmétique mondiale pondérée par la population, la concentration de ²²²Rn de toutes origines dans les habitations est estimée à 39 Bq/m³ [16].
- 3.8. L'émanation de ²²²Rn à partir du radium présent dans les matériaux de construction contribue elle aussi à la concentration de ²²²Rn dans un environnement intérieur. La contribution relative des matériaux de construction est en général plus importante lorsque la concentration totale de ²²²Rn à l'intérieur d'un bâtiment est faible. Le radon 222 libéré par les matériaux de construction est rarement le principal responsable des fortes concentrations de ²²²Rn dans un environnement intérieur.
- 3.9. Les calculs effectués pour une maison modèle en briques indiquent que l'émanation de ²²²Rn provenant des matériaux de construction intervient en moyenne pour 10 Bq/m³ dans la concentration de ²²²Rn à l'intérieur de l'habitation [17], ce qui représente environ 25 % de la concentration moyenne mondiale de ²²²Rn dans un environnement intérieur. Dans les pays de l'Union européenne, on estime que la contribution des matériaux de construction aux concentrations de ²²²Rn à l'intérieur des bâtiments est le plus souvent de l'ordre de 10-20 Bq/m³ [18], ce qui correspond à une dose effective individuelle annuelle comprise entre 0,3 et 0,6 mSv. Aux États-Unis, leur contribution auxdites concentrations se situe, selon les estimations, dans une fourchette de 4 à 7 Bq/m³ [19].
- 3.10. Il peut arriver que la contribution des émanations de ²²²Rn provenant des matériaux de construction à la concentration de ²²²Rn dans un environnement intérieur atteigne, voire dépasse, 1 000 Bq/m³ [18]. Dans de tels cas, qui font figure d'exceptions, il y a fort à parier que le débit de dose effective correspondant au rayonnement gamma à l'intérieur des bâtiments excédera la valeur maximale du niveau de référence pour les matériaux de construction, qui est d'environ 1 mSv/a, comme indiqué au par. 5.22 du doc. de réf. [2]. Nous reviendrons plus en détail sur ce point au par. 3.55 et dans la section 4. L'émanation de radon 222 provenant des matériaux de construction peut également être contrôlée.

- 3.11. Les eaux de surface contiennent généralement du ²²²Rn en très faibles concentrations. En revanche, l'eau provenant du sous-sol et de sources d'approvisionnement privées peuvent présenter de fortes concentrations de ²²²Rn. La contribution du ²²²Rn libéré par l'eau potable à la concentration totale de ²²²Rn à l'intérieur d'un bâtiment n'est pas constante, étant donné que l'émanation ne se produit que lorsque l'eau s'écoule des robinets ou des pommeaux de douche. Aussi le ²²²Rn libéré par l'eau constitue-t-il rarement le facteur dominant à l'origine la présence de ²²²Rn en fortes concentrations dans un environnement intérieur, bien que des concentrations élevées puissent apparaître à court terme. L'ingestion d'eau contenant du ²²²Rn est également une voie d'exposition potentielle. Les directives de l'OMS sur la qualité de l'eau de boisson [10] renferment des informations sur la réduction des concentrations élevées de ²²²Rn dans les réserves d'eau potable.
- 3.12. Selon l'UNSCEAR [3], l'inhalation de ²²²Rn libéré par l'eau potable représente en moyenne 90 % de la dose estimée due au ²²²Rn. En outre, la dose effective moyenne due à l'inhalation de ²²²Rn libéré par l'eau potable dans l'air intérieur est d'environ 0,025 mSv/a, alors que la dose effective totale moyenne due à l'inhalation de ²²²Rn, toutes origines confondues, et de ses produits de désintégration est de 1,1 mSv/a [3, 17]⁴. Par conséquent, bien que l'inhalation soit la principale voie par laquelle l'exposition au ²²²Rn présent dans l'eau potable peut survenir, les doses moyennes reçues ne représentent bien souvent qu'une petite fraction des doses provenant du ²²²Rn d'autres origines que l'on trouve dans un environnement intérieur. Cependant, pour les familles qui tirent leur eau de puits profonds creusés dans des roches riches en uranium, l'approvisionnement en eau peut être le principal facteur contribuant aux fortes concentrations de radon relevées dans l'air intérieur, avec des doses individuelles de plusieurs millisieverts [20, 21].

Diffusion d'informations sur le radon

3.13. Aux termes du par. 50 du doc. de réf. [2], « [1]e gouvernement fournit des informations sur les niveaux de radon dans les locaux et sur les risques sanitaires

 $^{^4}$ Le doc. de réf. [17] indique comment est calculée la dose totale d'inhalation de $^{222}\rm{Rn}$. Ce calcul part de l'hypothèse que les facteurs d'équilibre pour le $^{222}\rm{Rn}$ sont de 0,4 dans un environnement intérieur et de 0,6 dans un environnement extérieur, que la concentration d'activité moyenne pour le $^{222}\rm{Rn}$ dans un environnement intérieur est de 40 Bq/m³ et de 10 Bq m³en extérieur, que le facteur d'occupation annuel est de 7 000 heures dans un environnement intérieur et de 1 760 heures en extérieur, et que le facteur de conversion de dose est de 9 nSv/(Bq-h-m⁻³) pour une concentration équivalente à l'équilibre.

qui y sont associés et, s'il y a lieu, établit et met en œuvre un plan d'action pour le contrôle de l'exposition du public due au radon dans les locaux. »

- 3.14. L'obligation d'informer le public s'applique indépendamment du fait qu'un mesurage du radon soit ou non effectué ou prévu. Il conviendra de fournir ici, par exemple, des informations génériques sur la distribution du radon dans le monde et sa variabilité, de donner des preuves scientifiques des problèmes de santé que risque de provoquer une exposition à long terme au radon dans un environnement intérieur, y compris le lien synergique entre l'exposition au radon et l'inhalation de la fumée de tabac, de rappeler les principes de base régissant la prévention de l'accumulation de radon dans les nouvelles constructions et la mise en œuvre d'actions correctives visant à réduire les concentrations élevées de radon dans les bâtiments existants, et d'expliquer la relation entre la politique relative au radon et celle ayant trait à la qualité de l'air intérieur, ou encore l'éventuel hiatus entre les dispositions relatives aux économies d'énergie et les mesures de protection anti-radon. Lorsque l'État dispose de données fiables sur les concentrations de radon dans un environnement intérieur, ces informations doivent être rendues publiques ; elles devraient, dans l'absolu, être consultables en ligne afin que les parties intéressées puissent y accéder et les télécharger.
- 3.15. La corrélation entre le cancer du poumon dû au tabagisme et l'exposition au radon est bien établie. Les fumeurs et anciens fumeurs ayant récemment arrêté le tabac présentent, à la base, un risque de cancer du poumon sensiblement plus grand que ceux qui n'ont jamais fumé de toute leur vie. L'exposition au radon entraîne ainsi un risque conjugué que les autorités nationales devraient intégrer dans des informations et conseils qu'elles dispensent concernant le radon et qui devrait les amener à coordonner leur action avec les programmes nationaux de lutte contre le tabagisme [7].
- 3.16. Avant de réaliser des études visant à mesurer la présence de radon, les autorités nationales devraient établir et diffuser des informations susceptibles d'intéresser les propriétaires de logements, en particulier ceux qui pourraient être invités à y participer. Ces informations devraient indiquer, d'une manière générale, quels sont les risques liés au radon et préciser ensuite comment ce dernier sera mesuré et de quelle façon les résultats de ces mesures seront communiqués aux propriétaires. Les questions relatives à la confidentialité de ces résultats devraient également être abordées. Si un niveau de référence a déjà été fixé, il conviendrait également d'en faire état et expliquer comment réduire les concentrations de radon supérieures au niveau de référence.

3.17. Si une politique nationale ayant pour but de contrôler l'exposition du public due au radon doit être élaborée, l'autorité nationale devra préparer des informations à ce sujet et les mettre à la disposition de toutes les parties intéressées, à savoir les décideurs, les médecins, les professionnels du bâtiment (y compris les architectes, les ingénieurs, les métreurs et les entrepreneurs), ainsi que le public. L'autorité nationale pouvant comprendre plusieurs organismes et services gouvernementaux différents qui sont chacun responsables de l'un ou l'autre aspect de la politique nationale, une étroite coordination s'imposera pour garantir la clarté et la cohérence de tous les renseignements fournis. Les instances décisionnelles, au niveau national comme au plan local, devront être tenues pleinement informées.

Études sur la présence de radon dans un environnement intérieur

3.18. Le gouvernement est tenu de veiller à ce que « des informations soient rassemblées sur les concentrations d'activité de radon dans les habitations et d'autres bâtiments à taux d'occupation élevés pour les personnes du public par des moyens appropriés tels que des études représentatives sur le radon » {par. 5.19 a) du doc. de réf. [2]}. Afin d'évaluer l'ampleur des mesures qui pourraient s'avérer nécessaires pour contrôler l'exposition du public due au radon dans un environnement intérieur, l'autorité nationale devra dans un premier temps passer en revue toutes les données existantes sur lesdites concentrations, en particulier les mesures effectuées dans les régions où il y a lieu de penser qu'elles pourraient être importantes. Les régions en question sont notamment celles qui, du fait de la géologie locale, pourraient receler des concentrations élevées d'uranium dans le sol ainsi que les régions calcaires karstiques dont les eaux souterraines pourraient contenir de fortes concentrations de radon provenant de gisements minéraux. Les concentrations de radon dans un environnement intérieur risquent également d'être importantes dans les zones dont les sols se caractérisent par une perméabilité exceptionnelle (comme les eskers ou les crêtes composées de gravier perméable), et ce malgré une concentration d'uranium peu élevée.

3.19. Si ces données manquent, l'autorité nationale devra envisager d'organiser des études localisées. Pour déterminer par quelles zones commencer, elle devra prendre en compte, outre les critères géologiques mentionnés au par. 3.18, les informations disponibles sur les concentrations de radon dans un environnement intérieur observées dans les États voisins. Ces études localisées ont l'avantage de faciliter les décisions relatives à la densité d'échantillonnage nécessaire pour mener à bien une étude nationale. À supposer par exemple que de fortes concentrations de radon aient été relevées à l'intérieur de bâtiments et que l'on sache que de nombreuses autres zones présentent des caractéristiques

géologiques similaires dans le pays, il y aurait tout lieu d'envisager de réaliser un grand nombre de mesures dans l'étude nationale. À l'inverse, si seules de faibles concentrations ont été observées dans des zones où l'on aurait pu s'attendre à ce qu'elles soient importantes, l'étude nationale pourra se contenter d'une plus faible densité de mesures.

- 3.20. Même si l'examen des données existantes et les résultats des études localisées lancées par l'autorité nationale ne révèlent pas de concentrations élevées de radon à l'intérieur des bâtiments, l'autorité nationale n'en devra pas moins évaluer le degré d'exposition de la population. Elle procédera pour ce faire à ce qu'il est convenu d'appeler une étude nationale sur le radon. Au moment d'entreprendre une telle étude, il faudra prendre soin :
- a) d'identifier les zones où l'on s'attend à trouver une plus grande proportion d'habitations présentant des concentrations élevées de radon dans leur environnement intérieur. Il suffira pour ce faire de procéder à une enquête reposant sur une base géographique, dont les résultats serviront à dresser des cartes des risques dus au radon et à délimiter les zones sujettes au radon (voir annexe II);
- b) d'estimer l'exposition moyenne de la population due au radon, et déterminer l'éventail des expositions observées, afin de les comparer aux expositions dues à d'autres sources de rayonnements. Le mieux sera ici de se référer à une étude nationale sur les concentrations de radon dans l'environnement intérieur de logements choisis au hasard, en tenant compte de la densité de population [5].
- 3.21. Pour peu qu'elle soit soigneusement conçue, une seule étude pourra suffire pour traiter simultanément les points 3.20 a) et b). Les opérations de mesure que supposent de telles études devront être effectuées sur plusieurs mois voire sur un an, dans l'absolu dans chaque habitation examinée, de façon à limiter au maximum les incertitudes [22]. Les résultats obtenus permettront de définir les niveaux d'exposition au radon et serviront de base pour les décisions futures quant à l'élaboration et à la mise en œuvre d'une politique nationale de contrôle de l'exposition du public due au radon. Les différents éléments d'une telle politique formeront le « plan d'action » en la matière (voir paragraphes 3.23 à 3.59).
- 3.22. Les études susmentionnées mettront en évidence la variation des concentrations de radon dans les habitations, quelle que soit l'origine de celui-ci. Dans la grande majorité des cas, le radon provient du sol situé sous la bâtisse ; dans certains cas cependant, il provient des matériaux de construction ou du

système d'adduction d'eau. Les situations dans lesquelles le radon provenant des matériaux de construction ou du système d'adduction d'eau pourrait contribuer de manière significative à sa concentration dans l'air intérieur devront faire l'objet d'études distinctes.

Plan d'action sur le radon

Considérations générales

- 3.23. « Lorsque des concentrations d'activité de radon qui sont préoccupantes pour la santé publique sont identifiées [...], le gouvernement veille à ce que soit établi un plan d'action comportant des actions coordonnées de réduction des concentrations d'activité de radon pour les bâtiments existants et les bâtiments futurs », (par. 5.20 du doc. de réf. [2]). Ce plan d'action, qui devra être mis en œuvre par l'autorité nationale, exigera de cette dernière qu'elle :
- a) fixe « un niveau de référence approprié de ²²²Rn pour les habitations et autres bâtiments à taux d'occupation élevés pour les personnes du public » {par. 5.20 a) du doc. de réf. [2]};
- détermine quels autres types de bâtiments recevant un nombreux public, tels que les jardins d'enfants, les écoles et les hôpitaux, entrent dans le champ d'application du plan d'action sur le radon;
- c) fixe un niveau de référence approprié de ²²²Rn pour les lieux de travail tels que les bureaux et les usines ;
- d) facilite le mesurage du ²²²Rn dans les habitations et autres bâtiments à fort taux d'occupation du public ;
- e) recense les zones sujettes au ²²²Rn;
- f) octroie la « priorité à la réduction des concentrations d'activité de ²²²Rn dans les situations où cette mesure est susceptible d'être très efficace » {par. 5.20 c) du doc. de réf. [2]}, ce qui devra inclure des mesures visant à réduire les concentrations de ²²²Rn dans les systèmes d'adduction d'eau potable et à contrôler la teneur en radium des matériaux de construction, le cas échéant ;
- g) intègre « des mesures appropriées de prévention et d'atténuation de l'exposition due au ²²²Rn dans les codes de construction en vue d'empêcher l'entrée de radon et de faciliter les éventuelles actions correctives lorsqu'elles sont nécessaires » {par. 5.20 d) du doc. de réf. [2]};
- h) mette en place des mesures permettant de contrôler et réduire l'exposition due au ²²²Rn, et détermine également les circonstances dans lesquelles ces mesures doivent être obligatoires ou volontaires ;
- i) évalue l'efficacité du plan d'action.

Des conseils supplémentaires concernant l'établissement d'un plan d'action sur le radon figurent dans le manuel de l'OMS consacré au radon présent à l'intérieur des bâtiments [7]. On trouvera par ailleurs des exemples de plans d'action nationaux sur le radon dans les documents cités dans les références [23 à 26].

3.24. L'autorité nationale devra faire en sorte que le plan d'action sur le radon soit étroitement coordonné avec les autres programmes nationaux portant sur la qualité de l'air intérieur et l'efficacité énergétique. Les nouveaux logements économes en énergie permettent ainsi d'obtenir un taux de renouvellement de l'air inférieur à celui des logements existants, ce qui pourrait se traduire soit par une hausse, soit par une baisse du flux de gaz du sol (contenant du ²²²Rn) dans le bâtiment, en fonction des règles que prévoient les codes de construction nationaux. En améliorant l'efficience thermique d'un bâtiment, la température plus élevée de l'air intérieur peut faire baisser la pression à l'intérieur de ce bâtiment et entraîner ainsi un afflux plus important de ²²²Rn provenant du sol. Il conviendra de voir en quoi l'évolution des pratiques de construction, notamment celles qui concernent la qualité de l'air intérieur ou l'efficacité énergétique, influe sur les concentrations de radon dans l'environnement intérieur et sur l'efficacité des actions correctives et des mesures préventives portant sur le radon. Si l'évolution de ces pratiques est susceptible d'entraîner une augmentation des concentrations de radon dans l'environnement intérieur, il faudra envisager d'y apporter de nouvelles modifications dans les codes de construction nationaux.

Justification et optimisation des stratégies visant à déployer des mesures de radioprotection

- 3.25. Le gouvernement et l'organisme de réglementation ou une autre autorité compétente veillent à ce que les actions correctives et les mesures de protection soient justifiées et à ce que la protection et la sûreté soient optimisées (prescription 48 du doc. de réf. [2]).
- 3.26. La stratégie de protection que poursuivra le programme en vue de réduire les concentrations de radon dans un environnement intérieur devra apporter un avantage individuel ou sociétal suffisant pour compenser ses inconvénients. C'est au gouvernement ou à l'autorité nationale qu'incombera la responsabilité des décisions relatives à la justification des mesures de radioprotection.
- 3.27. Parmi les arguments de nature à justifier la mise en place de mesures de radioprotection, on pourra faire valoir que le radon est un important facteur d'exposition aux rayonnements et représente la deuxième cause de cancer du poumon au sein de la population générale après le tabagisme, qu'il est désormais

techniquement possible de réduire les concentrations élevées de radon dans un environnement intérieur, que la politique relative au radon vient étayer d'autres politiques de santé publique telles que la politique relative à la qualité de l'air intérieur, lorsque d'autres polluants sont également présents, ou encore la politique de lutte contre le tabagisme [7, 27].

- 3.28. Les mesures d'optimisation de la protection visant à faire en sorte que l'exposition soit inférieure à un niveau de référence devront être déployées dans le cadre d'un processus continu et cyclique consistant à évaluer la situation pour voir s'il y a lieu d'intervenir (cadrage du processus), à définir les actions protectrices envisageables à la lumière des connaissances techniques les plus récentes quant aux moyens permettant raisonnablement de maintenir les expositions au plus bas, à choisir la meilleure option au vu des circonstances, à mettre en œuvre l'option retenue, et à vérifier régulièrement si l'évolution de la situation appelle des actions correctives [28].
- 3.29. Le processus d'optimisation devra être déployé dans cadre du plan d'action national sur le radon. Il devra être appliqué de telle façon que les concentrations de radon soient ramenées à un niveau aussi bas que possible, en-deçà du niveau de référence.
- 3.30. L'optimisation de la protection contre l'exposition due au radon dans un environnement intérieur peut être menée à bien en faisant appel aux techniques classiques d'analyse coûts-bénéfices. Des comparaisons peuvent être faites entre le coût que représente le nombre estimé de cas de cancer du poumon vraisemblablement imputables au radon à différents niveaux d'exposition, le choix des actions protectrices et le coût des mesures préventives et des actions correctives visant à réduire l'exposition due au radon dans un environnement intérieur. Ces analyses peuvent venir éclairer les décisions relatives à la rentabilité des mesures ayant pour but de réduire les concentrations de radon dans les bâtiments existants et dans les nouvelles constructions [7].

Mesure des concentrations de ²²²Rn

3.31. Le mesurage des concentrations de radon dans les habitations constitue une procédure nécessaire aux fins des études nationales et régionales ; il sert aussi à déterminer si les logements individuels présentent des taux de concentration de radon inacceptables [15]. La concentration de radon peut considérablement varier d'une habitation à l'autre, à telle enseigne qu'une concentration faible ou élevée de radon dans un logement donné ne saurait être jugée révélatrice des concentrations de radon dans les logements voisins. Des mesures de

concentrations peuvent également être effectuées pour confirmer l'efficacité des dispositions prises pour faire baisser des taux élevés de radon [15]. Ces mesures peuvent être réalisées par l'autorité nationale ou par d'autres instances telles que des organismes d'appui technique, des établissements universitaires ou des entreprises privées, ou encore par un panachage de ces différentes options.

- 3.32. Pour les mesures de concentration du radon dans les habitations et autres bâtiments à fort taux d'occupation du public, l'autorité nationale devra préciser :
- a) la durée minimale de la période sur laquelle s'étendront les mesures ;
- b) les normes de qualité des détecteurs de radon;
- c) les protocoles de mesurage;
- d) les éventuelles limitations saisonnières des mesures de concentrations ;
- e) l'application ou non de facteurs de correction saisonniers ;
- f) les normes de qualité en matière de communication des résultats aux propriétaires des logements et autres bâtiments à fort taux d'occupation du public ;
- g) les conseils à donner aux propriétaires de logements et autres bâtiments à fort taux d'occupation du public qui présentent des concentrations de radon supérieures au niveau de référence.

Ces critères peuvent varier en fonction de l'objectif du mesurage des concentrations de radon. Les techniques de mesure du radon font l'objet de l'annexe II.

- 3.33. L'autorité nationale devra veiller à ce qu'un système de gestion de la qualité soit prévu, de manière à garantir la fiabilité des résultats des mesures effectuées. Tous les organismes qui procèdent aux mesures du radon devront démontrer qu'ils possèdent les compétences requises pour qu'elles soient relevées avec précision et exactitude, et seront tenus de participer régulièrement à des exercices d'intercomparaison [29].
- 3.34. Si les mesures de concentrations de radon sont confiées à une entreprise privée, il faudra prévoir, si possible, de mettre les résultats à la disposition de l'autorité nationale. Celle-ci étant globalement chargée de formuler la politique sur le radon, elle pourrait utiliser les données résultant de ces mesures pour identifier les zones sujettes au radon. Les questions relatives à la confidentialité des mesures effectuées par les propriétaires devront être prises en compte.

Fixation d'un niveau de référence pour le ²²²Rn

- 3.35. À l'issue de l'évaluation de l'exposition du public due au ²²²Rn telle qu'elle ressort d'études appropriées, il conviendra de déterminer si les concentrations d'activité de radon sont préoccupantes d'un point de vue de santé publique. Si c'est le cas, l'autorité nationale sera tenue de décider quel sera le niveau de référence du ²²²Rn pour les habitations et autres bâtiments à fort taux d'occupation du public, et de l'instituer officiellement. Le paragraphe 5.20 a) du document GSR Part 3 [2] exige qu'un niveau de référence approprié soit établi compte tenu des circonstances sociales et économiques existantes, niveau qui ne devra pas dépasser, d'une manière générale, une concentration d'activité moyenne annuelle due au ²²²Rn de 300 Bq/m³⁵. Ce niveau de référence devra s'appliquer aux habitations et autres bâtiments dont les taux d'occupation par le public sont élevés.
- 3.36. Dans son manuel consacré au radon présent à l'intérieur des bâtiments [7], l'OMS propose un niveau de référence de 100 Bq/m³ afin de limiter le plus possible les risques sanitaires liés à une exposition due au ²²²Rn dans un environnement intérieur, ajoutant que « si ce niveau ne peut être atteint en raison de conditions propres au pays concerné, le niveau de référence choisi ne devra pas dépasser 300 Bq/m³ ».
- 3.37. La fixation du niveau de référence par l'autorité nationale devra se faire en concertation avec les parties intéressées. Les niveaux de référence devront être choisis en veillant à ce que les conséquences pratiques qui en découlent soient jugées réalistes et gérables. Il serait irréaliste, par exemple, de définir un niveau de référence qui aurait pour effet d'imposer des actions correctives dans la majorité des logements existants. Le pourcentage de logements qui nécessiteraient des actions correctives en fonction du niveau de référence devra entrer en ligne de compte dans le choix du niveau approprié.
- 3.38. Les niveaux de référence ne devront pas être perçus comme une ligne de séparation entre danger et sécurité. Ils devront servir de valeurs indicatives qui, une fois dépassées, devraient inciter à réfléchir à ce qui pourrait être fait pour réduire l'exposition due au ²²²Rn. L'autorité nationale pourra décider de comparer les risques associés au ²²²Rn à d'autres risques de la vie quotidienne.

 $^{^5}$ En prenant pour hypothèse un facteur d'équilibre pour le 222Rn de 0,4 et un taux d'occupation annuel de 7 000 heures, la valeur de la concentration d'activité de 300 $\rm Bq/m^3$ correspond à une dose effective annuelle de l'ordre de 10 mSv.

- 3.39. Dans un souci de simplicité et de cohérence, les autorités nationales fixent pour la plupart un seul et unique niveau de référence valable aussi bien pour les habitations et autres bâtiments existants à fort taux d'occupation du public que pour les nouvelles constructions de même type. Dans certains cas, elles établissent, pour les nouveaux logements et autres bâtiments à fort taux d'occupation du public, un niveau de référence inférieur à celui retenu pour les constructions existantes de même type. En règle générale, il est plus rentable d'arriver à baisser les concentrations de ²²²Rn dans les nouveaux logements que dans les logements existants, et il est plus facile aussi de prendre les mesures que cela suppose.
- 3.40. Aux termes du document GSR Part 3 [2], le niveau de référence de ²²²Rn pour les habitations et autres bâtiments à taux d'occupation élevés pour les personnes du public ne doit pas dépasser en général une concentration d'activité moyenne annuelle due au ²²²Rn de 300 Bq/m³. S'il ressort des données nationales que, dans un pays donné, le facteur d'équilibre ou le facteur d'occupation s'écartent sensiblement des valeurs présumées, il pourrait être indiqué de prévoir un niveau de référence supérieur à 300 Bq/m³, à condition de ne pas excéder une dose effective annuelle de l'ordre de 10 mSv. Il ne saurait toutefois en être ainsi décidé qu'au vu de la situation telle qu'elle se présente sur l'ensemble du territoire national, et à titre exceptionnel uniquement. Une différenciation régionale des niveaux de référence dans un même pays ne serait pas judicieuse, car cela risquerait de créer des difficultés pratiques.
- 3.41. Dans les bâtiments à faible taux d'occupation du public, comme les bureaux, les magasins et les bibliothèques, l'exposition tant des travailleurs que du public est gérée selon les principes régissant le contrôle de l'exposition professionnelle. Des informations relatives à la gestion de l'exposition due au radon sur ces lieux de travail figurent dans l'encadré en page 24.

Zones sujettes au radon

3.42. Une fois établie la cartographie du radon (voir annexe I), il est possible de déterminer les zones où les concentrations de ²²²Rn sont susceptibles d'être supérieures à la moyenne. Ces zones sont souvent qualifiées de « sujettes au radon »⁶. Les plus fortes concentrations individuelles de ²²²Rn se trouveront généralement dans les zones où sa concentration moyenne est la plus élevée. Cela

 $^{^6\,}$ Dans certains États, ces zones sont baptisées « zones à forte concentration de radon » ou « zones touchées par le radon ».

étant, des habitations affichant des concentrations de ²²²Rn supérieures au niveau de référence pourront également être recensées en dehors des zones dites sujettes au radon.

- 3.43. L'autorité nationale devra déterminer quelles sont les zones sujettes au radon sur son territoire et envisager d'y appliquer des mesures spécifiques. Diverses définitions des zones sujettes au radon ont été proposées. La CIPR [5] a suggéré de définir comme telles les zones qui comptent plus d'un certain pourcentage de logements présentant une concentration de ²²²Rn plus de dix fois supérieure à la valeur moyenne nationale. Certains pays qualifient de zones sujettes au radon celles dont on estime que les habitations susceptibles de présenter des concentrations de ²²²Rn supérieures au niveau de référence dépassent un certain pourcentage. Une fois arrêtée, la définition d'une zone sujette au radon ne devra pas être modifiée sans mûre réflexion ; cela étant, les zones ainsi désignées devront être revues à mesure que de nouvelles informations se font jour.
- 3.44. Une autre approche en matière de protection contre l'exposition due au radon à l'intérieur de nouvelles constructions consiste à s'en remettre à des mesures réalisées directement in situ pour déterminer la présence de ²²²Rn dans le gaz du sol et la perméabilité du sol. Des dispositions préventives seront ensuite élaborées en fonction des propriétés du sol mesurées dans une zone donnée où se situe un bâtiment et de la conception de ce dernier. Il existe pour ce faire des méthodes d'échantillonnage et de mesure simples et peu coûteuses. Cette approche est utilisée en République tchèque depuis 1991 [30, 31].
- 3.45. Outil destiné à l'autorité nationale, le concept de zones sujettes au radon se prête à des usages divers et variés. L'autorité nationale devra ainsi voir comment mettre à profit l'identification des zones sujettes au radon pour faire connaître les risques liés à l'exposition due au ²²²Rn et pousser les propriétaires à faire procéder à des mesures du radon. En outre, dans les zones sujettes au radon, l'autorité nationale devra exiger que le secteur du bâtiment ait recours à des techniques de construction qui limitent au maximum la pénétration du ²²²Rn et facilitent son élimination après les travaux si cela s'avère nécessaire. Dans certaines circonstances, il peut être financièrement intéressant de faire appel à des techniques de construction qui auront pour effet de réduire le plus possible la pénétration du ²²²Rn dans toutes les zones, surtout si d'autres problèmes touchant à la qualité de l'air se posent également. On trouvera des précisions à ce sujet dans les annexes III et IV.

Contrôle et réduction de l'exposition due au ²²²Rn

3.46. L'autorité nationale est tenue de veiller à ce qu'une stratégie de protection spécifie les objectifs à atteindre {par. 5.4 a) du doc. de réf. [2]}. Parmi les objectifs auxquels doit tendre ladite stratégie, il en est un qui consiste à déterminer quelles habitations présentent des concentrations de ²²²Rn supérieures au niveau de référence et à réduire ces concentrations. Le deuxième objectif à atteindre sera de réduire les concentrations moyennes de ²²²Rn dans les habitations. Pour qu'elle soit significative, cette réduction suppose la mise en place de codes de construction et l'adoption de pratiques qui fassent en sorte, pour l'édification des nouvelles constructions, de limiter la pénétration du ²²²Rn. Ces changements permettront, après quelque temps, de faire baisser les concentrations moyennes de ²²²Rn et les expositions qui en résultent, et d'atténuer les effets du radon sur la santé publique.

3.47. Il est demandé à l'autorité nationale de prendre des dispositions en vue de « l'évaluation des actions correctives et des mesures de protection disponibles pour atteindre les objectifs » {par. 5.5 a) du doc. de réf. [2]}. L'existence de mesures de contrôle qui soient efficaces, fiables, efficientes et relativement faciles à mettre en place constitue un élément essentiel de tout plan d'action sur le radon. L'autorité nationale devra édicter des règles exigeant que les prestataires qui fournissent des services visant à réduire les concentrations d'activité de radon dans un environnement intérieur soient compétents dans leur domaine et que leur intervention réponde aux besoins des clients. L'efficacité de toutes les techniques devra être testée et démontrée dans des conditions de travail réalistes, et évaluée également sur le long terme. L'autorité nationale devra envisager de se doter d'un système d'agrément ou de certification des prestataires de services visant à réduire l'exposition due au radon. Les actions correctives ayant pour but de réduire les concentrations d'activité du ²²²Rn dans les habitations existantes font l'objet de l'annexe IV.

3.48. Le gouvernement est tenu de déterminer « les circonstances dans lesquelles une action sera obligatoire ou volontaire, compte tenu des prescriptions juridiques et des circonstances sociales et économiques existantes » {par. 5.21 b} du doc. de réf. [2]}.

GESTION DU RADON SUR DES LIEUX DE TRAVAIL PEU FRÉQUENTÉS PAR LE PUBLIC

S'agissant des lieux de travail tels que les bureaux et les usines où l'exposition due au radon n'est pas gérée comme une situation d'exposition planifiée, l'autorité nationale est tenue de fixer le niveau de référence pour le ²²²Rn à une valeur qui ne dépasse pas une concentration d'activité moyenne annuelle de ²²²Rn de 1 000 Bq/m³ (par. 5.27 du doc. de réf. [2]). Les critères de choix de la valeur du niveau de référence sont les mêmes que ceux qui s'appliquent aux habitations et la valeur retenue devra être fonction d'une évaluation de la répartition des concentrations de ²²²Rn sur ces lieux de travail. L'autorité nationale devra en outre définir les critères de mesure applicables aux lieux de travail d'une manière identique à celle décrite au par. 3.32 pour les habitations.

Pour contrôler l'exposition due au ²²²Rn sur les lieux de travail, une autre approche peut être suivie, qui consiste à fixer le même niveau de référence pour tous les environnements intérieurs : le même niveau de référence s'appliquerait donc à tous les logements, aux autres bâtiments à forts taux d'occupation du public et aux lieux de travail [27]. Cette approche ne sera cependant appropriée qu'à la condition que la répartition du ²²²Rn à l'intérieur des lieux de travail soit similaire à celle qui prévaut pour les habitations, ce qui peut ou non être le cas. L'autorité nationale pourrait néanmoins voir ce qu'il en est et déterminer si cette approche peut être mise en œuvre.

En cas de dépassement du niveau de référence fixé pour les lieux de travail, l'employeur devra faire tout ce qui est raisonnablement en son pouvoir pour ramener les concentrations de ²²²Rn sous ledit niveau (par. 5.28 du doc. de réf. [2]). Une solution sera de limiter le nombre d'heures que passent les travailleurs dans telle ou telle zone, mais il peut s'avérer difficile de faire respecter une mesure de cet ordre. Dans certains lieux de travail bien particuliers, comme les grottes souterraines, il est possible de réduire la concentration de ²²²Rn en modifiant le taux de renouvellement d'air, mais les modifications ainsi opérées risquent d'avoir des conséquences inacceptables (cela pourrait, par exemple, endommager d'anciennes fresques murales peintes à la main ou détruire des sites d'intérêt touristique tels que des grottes aménagées pour les visiteurs). Si, pour quelque raison que ce soit, il n'est pas possible de ramener les concentrations de ²²²Rn sous le niveau de référence, l'autorité nationale devra s'assurer que les travailleurs sont protégés en appliquant les prescriptions pertinentes pour l'exposition professionnelle (par. 5.27 du doc. de réf [2]) dans des situations d'exposition planifiées, en recourant à une approche différenciée.

Des orientations concernant la protection des travailleurs figurent dans le doc. de réf. [11].

- 3.49. Dans le droit fil d'une approche différenciée, le plan d'action sur le radon devra comprendre des dispositions précisant que les actions correctives doivent être en priorité mises en œuvre dans les logements où les concentrations d'activité de ²²²Rn dépassent largement le niveau de référence, plutôt que dans les logements présentant des concentrations légèrement supérieures au niveau de référence ; il devra par ailleurs arrêter le calendrier de ces travaux. La CIPR [8] a indiqué que toute dose annuelle existante qui atteindrait 100 mSv justifierait presque systématiquement une intervention. L'autorité nationale devra songer à prévoir des actions correctives qui aient force contraignante pour les habitations et autres bâtiments à fort taux d'occupation où les concentrations d'activité du ²²²Rn pourraient entraîner une dose annuelle supérieure à 100 mSv.
- 3.50. La décision de réduire ou non les concentrations d'activité de ²²²Rn supérieures au niveau de référence est généralement laissée aux propriétaires des logements qui, dans la plupart des pays, devront également supporter le coût des actions correctives coût qui pourrait les dissuader de faire le nécessaire pour atténuer l'exposition imputable au ²²²Rn. Le gouvernement pourrait envisager de rembourser aux propriétaires tout ou partie du coût des actions correctives, en particulier pour les logements présentant des concentrations d'activité de ²²²Rn très élevées. Si des aides financières sont allouées, elles devront être assorties d'une clause de suivi prévoyant un mesurage destiné à évaluer l'efficacité des actions correctives.
- 3.51. Pour les logements locatifs, l'autorité nationale devra envisager d'imposer à leur propriétaire l'obligation de veiller à ce que les concentrations d'activité de ²²²Rn soient inférieures au niveau de référence. Il conviendra de vérifier la conformité de toute prescription en la matière au regard de la législation en vigueur relative aux logements locatifs. L'autorité nationale devra en outre avoir l'assurance que la législation encadrant le ²²²Rn peut être concrètement mise en œuvre.
- 3.52. L'autorité nationale devra envisager d'exiger qu'il soit procédé, lors de la vente d'un logement, à des mesures de la concentration d'activité de ²²²Rn et que des actions correctives soient entreprises, le cas échéant. L'obligation de mesurer les concentrations d'activité de ²²²Rn au moment de la vente de logements existants pourrait être bénéfique, non seulement pour multiplier le nombre de ceux dans lesquels des contrôles portant sur la présence de ²²²Rn ont été effectués, mais aussi pour faire en sorte que ceux dont les concentrations d'activité de ²²²Rn dépassent le niveau de référence fassent l'objet d'actions correctives. Des protocoles et procédures appropriés, conformes au cadre juridique national, devront être élaborés. On trouvera dans les documents cités en

référence des conseils relatifs à l'établissement de tels protocoles et procédures pour ce qui concerne les méthodes de test [22] et les méthodes d'investigation dans les bâtiments [15]. En outre, lorsque la législation et les conditions sociales du pays le permettent, l'autorité nationale devra veiller à ce que les institutions bancaires et les compagnies d'assurance soient pleinement impliquées dans ce processus.

- 3.53. L'autorité nationale devra s'assurer de la mise en place de codes et pratiques de construction qui fassent en sorte d'empêcher l'accumulation de ²²²Rn dans les nouvelles constructions. Ces codes devront comporter des prescriptions prévoyant de mesurer la présence de ²²²Rn dans les nouveaux logements au cours des six à douze mois suivant l'entrée des occupants dans les lieux. Ils devront avoir force contraignante. La décision de l'autorité nationale quant à leur applicabilité dans toutes les zones ou seulement dans celles qualifiées de sujettes au radon devra tenir compte du rapport coût-efficacité des mesures de prévention du ²²²Rn pour les nouvelles constructions comparativement à d'autres mesures de santé publique. Les méthodes utilisées pour empêcher l'accumulation de ²²²Rn dans les nouvelles constructions sont passées en revue dans l'annexe III.
- 3.54. L'incorporation dans les codes de construction nationaux de mesures préventives relatives au ²²²Rn devra s'opérer dans le cadre d'une coopération entre l'autorité nationale et les instances chargées d'établir la réglementation en matière de planification et de construction des bâtiments, en ce compris les services qui s'occupent de questions telles que la qualité de l'air intérieur et l'efficacité énergétique. L'inspection des sites constituant un volet important des textes réglementant la construction, ces derniers devront également régir la communication avec le corps des inspecteurs du bâtiment et les professionnels du secteur de la construction, ainsi que leur formation.
- 3.55. Les matériaux de construction qui sont le plus souvent à l'origine d'émanations notables de ²²²Rn sont les bétons contenant du schiste d'alun, le tuf volcanique, les granites et le phosphogypse. L'émanation de ²²²Rn peut être mesurée à partir d'échantillons de matériaux de construction, mais il n'est pas toujours facile de rapporter les résultats de ces mesures aux concentrations d'activité de ²²²Rn observées à l'intérieur des bâtiments après leur construction. Dès lors, s'il apparaît que ce lien devrait être établi, il incombera à l'autorité

nationale de contrôler la quantité de ²²²Rn émanant des matériaux de construction en imposant une limite à leur teneur en ²²⁶Ra⁷.

3.56. Lorsque les programmes de mesure du radon font état de la nécessité de réduire la concentration d'activité du ²²²Rn dans certains systèmes d'adduction d'eau potable, les interventions que cela exige devront être menées dans le respect des recommandations et de l'approche formulées par l'OMS [10].

Suivi de l'efficacité du plan d'action sur le radon

3.57. L'autorité nationale se devra d'évaluer l'efficacité de son plan d'action sur le radon. Les programmes de réduction du radon n'auront pas d'effet bénéfique immédiat en termes de santé publique au sein d'une population, puisque le principal risque sanitaire qui pourrait être évité est celui lié au cancer du poumon, dont la durée d'induction peut atteindre 35 ans. Même à long terme, il ne sera pas possible d'établir directement combien de vies auront été sauvées, étant donné que la réduction des risques sera répartie sur un très grand nombre d'individus. Aussi l'efficacité d'un tel programme devra-t-elle être appréciée au regard de la baisse des concentrations d'activité du radon observable dans les habitations et autres bâtiments à forts taux d'occupation du public, ce qui peut comporter des avantages supplémentaires en ce qui concerne l'amélioration de la qualité de l'air intérieur. Divers indicateurs pourront être utilisés à cet effet, tels que la diminution du nombre ou du pourcentage de logements présentant des concentrations d'activité du radon supérieures au niveau de référence ou la réduction des concentrations moyennes d'activité du radon dans les habitations.

3.58. Le nombre de logements existants dans lesquels les concentrations de radon mesurées ou identifiées dépassent le niveau de référence n'est guère révélateur de l'efficacité d'un plan d'action sur le radon en termes de vies sauvées, car nombreux sont les propriétaires qui ne suivent pas les recommandations visant à diminuer ces concentrations. Ces paramètres pourront toutefois servir à fixer des objectifs intermédiaires d'un programme de réduction du radon. D'autres paramètres, tels que le degré de sensibilisation au radon au sein du grand public, dans les métiers du bâtiment ou dans les milieux médicaux pourraient également être retenus à cet effet. Le degré de sensibilisation peut être évalué au vu du

⁷ Des études [18] montrent que, lorsque les doses dues aux rayonnements gamma demeurent inférieures à 1 mSv/a, les concentrations d'activité du ²²⁶Ra dans les matériaux de construction doivent être limitées, en pratique, à des niveaux qui ne devraient pas entraîner des concentrations d'activité de ²²²Rn dans un environnement intérieur supérieures à 200 Bq/m³.

nombre de demandes d'information ou de sollicitations portant sur la réalisation de mesures du radon, ou au moyen d'études de marché.

3.59. Nombreux sont les États où les populations sont peu sensibilisées aux risques d'exposition au ²²²Rn. Or, pour qu'un programme de réduction du radon réussisse à faire baisser les fortes concentrations d'activité du radon dans les habitations, la coopération du grand public est indispensable. Tout plan d'action sur le radon exigera de la part de l'autorité nationale l'élaboration de stratégies destinées à informer le public des risques dus au radon ainsi que des mesures préventives et actions correctives. Ces stratégies devront également cibler les organismes et groupes professionnels opérant dans les secteurs de l'immobilier et de la santé publique, tels que les entreprises de construction, les architectes, les autorités territoriales et le corps médical. On trouvera de plus amples détails à ce sujet à l'annexe V.

EXPOSITION DUE AU 220RN

Origines et concentrations du ²²⁰Rn dans un environnement intérieur

3.60. Le radon 220 a une période de 55,6 secondes et ses radionucléides ne peuvent migrer que sur une courte distance avant de se désintégrer. Aussi les concentrations d'activité du ²²⁰Rn dans un environnement intérieur sont-elles essentiellement fonction de l'émanation de ²²⁰Rn provenant des couches superficielles des matériaux qui composent les murs et les sols, sans qu'il faille chercher des origines plus lointaines. Il a ainsi été constaté que les murs et sols en terre étaient parfois à l'origine d'une partie non négligeable du ²²⁰Rn observée dans un bâtiment. L'ampleur des doses qui en résultent dépendra de la quantité de ²³²Th que recèlent le sol et les matériaux de construction, du taux d'émanation du ²²⁰Rn et du facteur d'occupation du bâtiment.

3.61. Les données relatives aux concentrations d'activité du ²²⁰Rn et de ses descendants dans les habitations sont extrêmement limitées et s'appuient bien souvent sur des mesures effectuées sur une courte période. L'UNSCEAR estime qu'en règle générale, la concentration d'activité des descendants du ²²⁰Rn dans les habitations, tous pays confondus, représente environ 0,3 Bq/m³ de concentration équivalente à l'équilibre⁸, ce qui correspond à une dose effective annuelle

⁸ La concentration équivalente à l'équilibre est la concentration d'activité du ²²²Rn ou du ²²⁰Rn en équilibre radioactif avec ses descendants à courte période ayant la même concentration d'énergie alpha potentielle que le mélange considéré (qui n'est pas à l'équilibre).

de 0,1 mSv [3]. La quasi-totalité de cette dose peut être attribuée à l'émanation de ²²⁰Rn provenant des matériaux de construction. Certaines mesures effectuées ont livré des résultats allant jusqu'à 76 Bq/m³ de concentration équivalente à l'équilibre. Ces niveaux particulièrement élevés dans un environnement intérieur concernent des maisons en bois et des maisons en terre que l'on trouve surtout en Chine et au Japon, ainsi que des constructions érigées en Italie pour lesquelles des matériaux volcaniques naturels ont été utilisés [32-35].

Études relatives à la présence de ²²⁰Rn dans un environnement intérieur

3.62. L'autorité nationale devra d'abord mener un petit nombre d'études dans les logements où l'on s'attend à trouver de fortes concentrations d'activité du ²²⁰Rn, notamment ceux dont les murs ou les sols sont faits de terre. Comme pour le ²²²Rn, les résultats des mesures de l'émanation de ²²⁰Rn provenant de matériaux de construction pourraient être difficiles à interpréter. Au besoin, il sera préférable de corroborer les concentrations d'activité du ²²⁰Rn dans l'air intérieur en contrôlant la teneur en ²³²Th des matériaux de construction.

3.63. La distribution de la teneur en ²²⁰Rn dans une pièce peut considérablement varier. Étant donné que le ²²⁰Rn présent dans l'air intérieur résulte pour l'essentiel de l'émanation de matériaux de construction, les concentrations d'activité les plus élevées se situeront vraisemblablement à proximité des murs renfermant de tels matériaux. Du fait de sa courte période, le ²²⁰Rn se désintègre en grande partie avant de pouvoir migrer. La concentration d'activité du ²²⁰Rn diminue donc fortement à mesure que l'on s'éloigne des matériaux de construction et peut être divisée par 100 à une distance de 1 m [32].

3.64. Si le radon 220 peut se désintégrer presque complètement dans un environnement intérieur, les concentrations d'activité de ses descendants demeurent quant à elles importantes. Les concentrations d'activité du gaz ²²⁰Rn ne constituent donc pas un indicateur fiable des doses délivrées par ses descendants. Il existe désormais de bonnes techniques de mesure passive du gaz ²²⁰Rn, mais elles ne permettent pas d'obtenir une estimation valable des concentrations d'activité des descendants du ²²⁰Rn ni, partant, des doses qui y sont associées ⁹.

⁹ Sur l'ensemble des descendants du ²²⁰Rn, seuls le ²¹²Pb et le ²¹²Bi contribuent de façon significative à la concentration d'énergie alpha potentielle [32]. La contribution du précurseur ²²⁰Rn par becquerel est quasiment trois fois moindre que celle du ²¹²Pb. Dès lors que la concentration d'énergie alpha potentielle provient pour l'essentiel du ²¹²Pb, la mesure de la concentration d'activité de ce dernier dans l'air permet généralement d'avoir une estimation correcte de la concentration d'énergie alpha potentielle.

Contrôle et atténuation de l'exposition due au ²²⁰Rn

- 3.65. Les autorités nationales de la plupart des États n'auront pas besoin de réglementer l'exposition due au ²²⁰Rn. Dans les pays qui affichent de fortes concentrations d'activité du ²²⁰Rn dans certaines habitations, l'autorité nationale devra envisager de définir un niveau de référence pour le ²²⁰Rn, qu'il conviendra d'exprimer en termes de concentration équivalente à l'équilibre du ²²⁰Rn. Les indications fournies aux paragraphes 3.35 à 3.40 concernant la fixation d'un niveau de référence pour le ²²²Rn vaudront également pour la détermination d'un niveau de référence du ²²⁰Rn.
- 3.66. Là où il s'avère que certains matériaux de construction émettent d'importantes quantités de ²²⁰Rn, l'autorité nationale devra envisager d'interdire l'utilisation de ces matériaux pour la construction d'habitations, conformément aux critères énoncés dans la section 4.
- 3.67. Lorsque de fortes concentrations d'activité émanant de descendants du ²²⁰Rn sont relevées dans des logements, il est possible de les faire considérablement baisser en appliquant des peintures ou enduits sur les surfaces des murs ou des sols qui émettent du ²²⁰Rn. Le fait d'occuper de préférence, dans une pièce, les espaces situés loin des murs et de dormir sur des lits surélevés par rapport au sol constitue un moyen efficace de réduire l'inhalation de ²²⁰Rn.

4. CONTRÔLE DE L'EXPOSITION DUE AUX RAYONNEMENTS GAMMA DANS UN ENVIRONNEMENT INTÉRIEUR

SOURCES NATURELLES DE RAYONNEMENTS GAMMA

4,1. Les radionucléides d'origine naturelle tels que l'²³⁸U et ses descendants, le ²³²Th et ses descendants et le ⁴⁰K sont présents dans les sols et les matériaux de construction en quantités variables. Les deux principales voies d'exposition aux rayonnements gamma dans un environnement intérieur sont les radionucléides présents dans le sol et ceux présents dans les matériaux de construction. On trouvera dans cette section des recommandations et conseils concernant le contrôle de l'exposition aux rayonnements gamma qui passe par ces deux voies.

- 4.2. De nombreuses études ont été réalisées pour déterminer les concentrations de fond en radionucléides dans les sols [36-38]. Il en ressort que les radionucléides émetteurs gamma des familles de 1'238U, du 232Th et du 40K contribuent de manière à peu près égale à la dose d'exposition due aux rayonnements gamma externes que l'on subit en situation normale en extérieur et à l'intérieur des bâtiments. Les concentrations d'activité médianes d'238U, de 232Th et de 40K dans la croûte terrestre sont respectivement de 33, 45 et 410 Bq/kg [3]. Les concentrations d'activité dans des matériaux de construction tels que le béton sont elles aussi, en règle générale, relativement proches des concentrations d'activité observées dans la croûte terrestre, avec des valeurs de 40, 30 et 400 Bq/kg pour le 226Ra, le 232Th et le 40K respectivement [18].
- 4.3. La dose effective annuelle moyenne mondiale due à l'exposition externe à des sources naturelles de rayonnement tellurique est de 0,48 mSv, dont 0,41 mSv pour l'exposition dans un environnement intérieur (dans l'hypothèse d'un facteur d'occupation de 80 %) et de 0,07 mSv pour l'exposition en extérieur (dans l'hypothèse d'un facteur d'occupation de 20 %) [3]. Les valeurs moyennes nationales de la dose effective annuelle due à l'exposition externe à des sources naturelles de rayonnement tellurique sont le plus souvent comprises entre 0,3 et 0,6 mSv.
- 4.4. La nature de l'exposition aux rayonnements diffère selon que les individus vivent ou travaillent dans un bâtiment ou en extérieur. La protection qu'offre le bâtiment diminuera l'exposition due aux radionucléides présents dans le sol. Cependant, les radionucléides d'origine naturelle présents dans les matériaux de construction augmenteront le débit de dose dû aux rayonnements gamma à l'intérieur du bâtiment. Celui-ci protégera aussi ses occupants des rayonnements cosmiques, mais généralement dans une faible mesure. Selon l'UNSCEAR, le débit de dose moyen mondial d'exposition due aux rayonnements gamma est 1,4 fois plus élevé dans un environnement intérieur qu'en extérieur, et ce dans des proportions qui varient selon les régions entre 0,8 et 2,0 [3].
- 4.5. Le béton est l'un des matériaux de construction les plus couramment utilisés. Les variations en termes de concentrations de radionucléides d'origine naturelle observées dans le béton sont fonction des types de granulats et d'additifs chimiques entrant dans sa fabrication. Les granulats couramment utilisés sont le sable, les gravillons et les galets, qui, normalement, n'accroissent pas la radioactivité du béton. Il arrive cependant que d'autres matériaux servent également de ballast dans la composition du béton : c'est le cas de la pierre ponce, qui présente une forte concentration d'activité de ²²⁶Ra, et du granit, qui affiche

souvent une forte concentration d'activité à la fois de ⁴⁰K et d'²³⁸U. L'utilisation de ces matériaux peut accroître et accroît effectivement la radioactivité du béton.

- 4.6. Le béton cellulaire, ou béton léger, est composé pour l'essentiel de matériaux identiques à ceux qui entrent dans la fabrication du béton ordinaire, mais une petite quantité de poudre d'aluminium y est ajoutée pour conférer au produit final sa structure cellulaire. Le schiste d'alun, qui était auparavant utilisé comme ballast dans le béton ordinaire et le béton cellulaire, présente une concentration d'activité de ²²⁶Ra particulièrement élevée, qui peut ici atteindre 2 600 Bq/kg [18].
- 4.7. Des sous-produits et résidus industriels sont parfois utilisés dans la fabrication de matériaux de construction, à savoir notamment les cendres volantes (provenant de la combustion du charbon et de la tourbe), le laitier de haut fourneau et le phosphogypse. Ces matériaux peuvent présenter de plus fortes teneurs en radionucléides d'origine naturelle en raison des processus de concentration générés durant la production des résidus [3].
- 4.8. Les matériaux de construction naturels tels que le granit et le marbre affichent des concentrations élevées de ²²⁶Ra et le granit peut également présenter une forte concentration de ²³²Th et de ⁴⁰K [3].
- 4.9. Des sols contenant des concentrations extrêmement élevées de radionucléides d'origine naturelle ont été signalés en différents endroits du globe [3]. Dans certaines régions de l'Azerbaïdjan, du Brésil, de la Chine, de l'Égypte, de l'Inde, de l'Indonésie, de l'Italie, de la Roumanie et de la République tchèque, la présence d'importantes concentrations de radionucléides d'origine naturelle dans le sol fait que les doses efficaces annuelles de rayonnements gamma atteignent plusieurs mSv elles dépassent parfois 10 mSv dans certaines zones de l'Espagne, de la République islamique d'Iran et de la République tchèque [3]. Il se pourrait que, dans ces régions, le sol constitue la principale cause d'exposition de la population aux rayonnements gamma.

MÉTHODES DE MESURE DES RAYONNEMENTS GAMMA

4.10. Le choix de la technique de mesure diffère selon que l'on souhaite mesurer uniquement l'exposition totale aux rayonnements gamma en extérieur ou à l'intérieur d'un bâtiment, ou identifier et quantifier les radionucléides présents dans un matériau de construction donnant lieu à une exposition de ce type [38].

- 4.11. Les débits de dose gamma dans un environnement intérieur sont d'ordinaire mesurés directement au moyen d'un compteur Geiger-Müller, d'une chambre d'ionisation ou d'un compteur à scintillation. Une autre possibilité consiste à procéder à des mesures sur une certaine durée dans les logements à l'aide de dosimètres ou de détecteurs à verre thermoluminescent. Le fonctionnement et les avantages respectifs de ces types de détecteurs sont expliqués plus en détail dans le doc. de réf. [39].
- 4.12. La détection et la quantification de radionucléides spécifiques s'effectuent habituellement en laboratoire, au moyen d'une analyse d'échantillons représentatifs. La spectrométrie gamma, réalisée à l'aide d'un détecteur à iodure de sodium ou d'un détecteur au germanium, est la méthode de test privilégiée. Les détecteurs au germanium de haute pureté (HPGe) sont désormais couramment utilisés dans les laboratoires de test ou par le personnel chargé de procéder à des mesures in situ dans des habitations [38, 40, 41].

ÉTUDES PORTANT SUR LES RAYONNEMENTS GAMMA

- 4.13. L'autorité nationale devra s'appuyer sur les données issues d'études relatives aux niveaux de rayonnements gamma en extérieur pour déterminer quelles sont les zones où les radionucléides d'origine naturelle présents dans le sol pourraient contribuer de manière significative à exposer les occupants d'un bâtiment à des rayonnements gamma à l'intérieur de ce dernier. Si les données disponibles concernant les niveaux de rayonnements gamma en extérieur sont peu nombreuses, une étude devra être commanditée par l'autorité nationale afin d'y remédier.
- 4.14. L'autorité nationale devra exploiter les données issues des études relatives aux niveaux de radionucléides d'origine naturelle présents dans les matériaux de construction pour déterminer ceux qui sont susceptibles de contribuer de manière significative à une exposition aux rayonnements gamma dans un environnement intérieur. Si les données disponibles concernant les niveaux de radionucléides présents dans les matériaux de construction sont peu nombreuses, l'autorité nationale devra commanditer une étude pour y remédier et/ou demander aux fabricants et importateurs de matériaux de construction de lui fournir ces informations.

CONTRÔLE ET ATTÉNUATION DE L'EXPOSITION DUE AUX RAYONNEMENTS GAMMA

Rayonnements gamma provenant des sols

- 4.15. L'autorité nationale devra examiner s'il y a lieu de mettre en place des contrôles en vue de limiter l'édification de nouveaux bâtiments dans des zones affichant des niveaux particulièrement élevés de rayonnement de fond naturel. La CIPR [8] a indiqué que toute dose annuelle existante qui avoisinerait le seuil de 100 mSv justifierait quasi systématiquement une intervention. La notion de « dose annuelle existante » recouvre les doses provenant d'expositions dues à toutes les sources, d'une exposition externe due aux matériaux de construction et au sol ainsi que d'une exposition interne due au radon et aux radionucléides présents dans les aliments.
- 4.16. Dans les rares cas où les radionucléides d'origine naturelle présents dans le sol génèrent des débits de dose élevés dus aux rayonnements gamma à l'intérieur de bâtiments existants, l'autorité nationale devra indiquer à leurs occupants comment faire pour y être moins exposés. La solution d'un déménagement pourra également être évoquée, mais cela suppose de prendre en compte les aspects socio-économiques qu'elle implique.

Rayonnements gamma provenant de matériaux de construction

- 4.17. Le paragraphe 5.22 du doc. de réf. [2] fait obligation de fixer « des niveaux de référence spécifiques pour l'exposition due à des radionucléides dans des produits de base tels que les matériaux de construction [...], le plus souvent exprimé[s] sous la forme d'une dose effective annuelle à la personne représentative ou [...] fond[és] sur une telle dose et ne dépass[ant] généralement pas une valeur d'environ 1 mSv ». Le niveau de référence d'environ 1 mSv s'applique à la dose reçue lors de l'exposition aux rayonnements gamma provenant uniquement des matériaux de construction (à l'exclusion de toute dose supplémentaire provenant du ²²²Rn ou du ²²⁰Rn libéré par les matériaux de construction dans l'air intérieur).
- 4.18. Les principaux éléments qui contribuent à la dose générée par l'exposition due aux rayonnements gamma provenant de matériaux de construction sont le ²²⁶Ra et le ²³²Th et leurs descendants, ainsi que le ⁴⁰K. Plusieurs États ont édicté des directives ou des règlements destinés à exercer un contrôle sur la quantité de radionucléides d'origine naturelle présents dans les matériaux de construction. Le rapport établi par G. Åkerblom [42] montre que les règlements ou directives

ayant trait aux matériaux de construction s'appuient principalement sur un indice de concentration d'activité calculé à partir des concentrations d'activité du ⁴⁰K, du ²²⁶Ra et du ²³²Th présents dans les matériaux de construction. La spécification et l'application d'un indice de concentration d'activité obéissent à une approche qui varie selon les pays. Pour les matériaux de construction présentant des coefficients d'émanation élevés, l'autorité nationale devra, pour contrôler le taux d'émanation du radon, ajouter des critères relatifs à la teneur en radium du matériau de construction.

4.19. L'autorité nationale devra mettre en place une procédure permettant de déterminer si les matériaux de construction contenant des radionucléides d'origine naturelle respectent le niveau de référence. On trouvera dans les paragraphes qui suivent un exemple de procédure pour un niveau de référence de 1 mSv d'exposition externe aux rayonnements gamma. Si un État utilise un niveau de référence d'une valeur différente, la détermination des matériaux de construction soumis à des restrictions dans ce pays devra suivre une procédure différente. La procédure devra consister à calculer les concentrations d'activité des radionucléides d'origine naturelle dans le matériau de construction, pour ensuite déterminer l'indice de concentration d'activité lié à l'exposition aux rayonnements gamma dans un bâtiment édifié avec ce matériau bien précis. L'indice de concentration d'activité est un outil de dépistage permettant de voir quels sont les matériaux de construction qui devraient éventuellement faire l'objet de restrictions.

4.20. La formule ci-dessous donne un exemple d'indice de concentration d'activité I dont devrait tenir compte l'autorité nationale $[18]^{10}$:

$$I = \frac{C_{\text{Ra}}}{300 \text{ Bq/kg}} + \frac{C_{\text{Th}}}{200 \text{ Bq/kg}} + \frac{C_{\text{K}}}{3000 \text{ Bq/kg}}$$
(1)

où:

 $C_{\rm Ra}$ est la concentration d'activité du $^{226}{\rm Ra}$ dans le matériau de construction, exprimée en Bq/kg ;

 C_{Th} est la concentration d'activité du ²³²Th dans le matériau de construction, exprimée en Bq/kg ;

¹⁰ Le calcul de l'indice de concentration d'activité, ainsi que le calcul des valeurs supérieures pour ce même indice (voir le par. 4.21), figurent à l'annexe I du doc. de réf. [18].

- et $C_{\rm K}$ est la concentration d'activité de $^{40}{\rm K}$ dans le matériau de construction, exprimée en Bq/kg.
- 4.21. Si l'indice de concentration d'activité I est inférieur à 1 pour les matériaux en vrac comme le béton et les briques, et si I est inférieur à 6 pour les matériaux de revêtement tels que le carrelage tuiles, la dose effective annuelle résultant de l'exposition due aux rayonnements gamma provenant des radionucléides présents dans les matériaux de construction sera inférieure au niveau de référence d'environ 1 mSv. Ces matériaux de construction ne doivent pas être soumis à des restrictions d'utilisation. L'expérience montre que, pour la majorité des matériaux de construction, ces valeurs respectives de l'indice de concentration d'activité ne dépassent pas les limites fixées [18, 43]. S'agissant des matériaux de construction pour lesquels on observe un dépassement des valeurs de I = 1 ou I = 6 respectivement, un examen complémentaire est nécessaire avant d'autoriser leur utilisation.
- 4.22. En ce qui concerne les matériaux de construction devant faire l'objet d'un examen plus approfondi, l'autorité nationale devra exiger que soient calculées les doses résultant d'une exposition externe aux rayonnements gamma qu'entraînerait leur utilisation. Cet examen devra être réalisé sur la base de scénarios reposant sur un usage classique du matériau en question. L'évaluation de la dose devra tenir compte des niveaux de fond de l'exposition externe aux rayonnements due aux radionucléides d'origine naturelle présents dans un sol non remanié. Elle devra de préférence être mise au point par le fabricant des matériaux de construction et soumise à l'autorité nationale.
- 4.23. On trouvera à l'annexe VI [18] un exemple de méthode de calcul des doses résultant d'une exposition externe aux rayonnements gamma provenant de matériaux de construction.
- 4.24. Pour les matériaux de construction nécessitant un examen plus approfondi, la dose effective calculée (*E*) résultant d'une exposition externe aux rayonnements gamma due au matériau en question devra être comparée au niveau de référence. Si elle est inférieure au niveau de référence de 1 mSv, ce matériau ne devra pas être soumis à des restrictions d'utilisation ; si elle excède le niveau de référence de 1 mSv, des mesures appropriées devront être prises par l'autorité nationale, qui pourront consister en des restrictions visant spécifiquement les usages envisagés pour ce matériau.
- 4.25. Certains matériaux de construction naturels traditionnellement utilisés parfois des décennies, voire des siècles durant contiennent des radionucléides

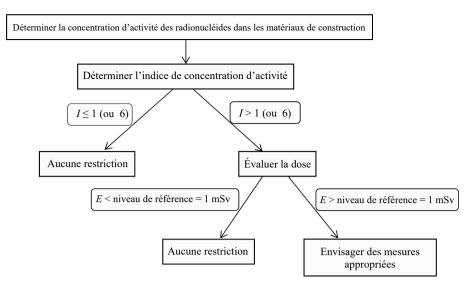


FIG. 2. Logigramme du système de contrôle des matériaux de construction recommandé pour ce qui concerne l'exposition externe due aux rayonnements gamma.

d'origine naturelle qui affichent des concentrations d'activité telles que la dose effective annuelle de 1 mSv d'exposition externe due aux rayonnements gamma risque d'être dépassée. Dans ce cas, il conviendra de peser les inconvénients et les coûts, notamment financiers et sociaux, qu'entraînerait l'interdiction d'y avoir recours dans les nouvelles constructions.

- 4.26. La figure 2 illustre, sous la forme d'un logigramme, le système de contrôle des matériaux de construction recommandé pour ce qui concerne l'exposition externe due aux rayonnements gamma.
- 4.27. Les résidus d'activités faisant intervenir des matières radioactives naturelles, tels que les cendres volantes et le phosphogypse, entrent dans la fabrication de différents types de matériaux de construction. Il conviendra d'appliquer aux matériaux de construction manufacturés la méthode d'évaluation des doses fondée sur la détermination de l'indice de concentration d'activité ou toute autre méthode alternative ; les constituants de ces matériaux en seront dispensés. Toutefois, si leurs résidus sont susceptibles de contenir des radionucléides d'origine naturelle autres que le ²²⁶Ra, le ²³²Th et le ⁴⁰K, une évaluation de l'exposition due à ces radionucléides devra également être effectuée. En outre, dans l'hypothèse où les concentrations d'activité du ²³²Th et du ²²⁸Ra ne seraient pas en équilibre dans

lesdits résidus, la formule indiquée au par. 4.20 devra utiliser la concentration d'activité du ²²⁸Ra au lieu de la concentration d'activité du ²³²Th [Eq. 1)].

Rayonnements gamma provenant de matériaux de construction présents dans des bâtiments existants

- 4.28. Des mesures de protection pourront s'avérer nécessaires pour les bâtiments existants qui affichent des niveaux élevés de dose effective annuelle résultant de l'exposition aux rayonnements gamma dus aux radionucléides présents dans les matériaux de construction. L'autorité nationale devra, s'il y a lieu, établir des niveaux de référence pour l'exposition due aux rayonnements gamma provenant de matériaux de construction présents dans les bâtiments existants. Le doc. de réf. [2] exige que l'autorité nationale veille à ce que les mesures de protection soient justifiées et à ce que la protection et la sûreté soient optimisées (prescription 48). Il demande par ailleurs à l'autorité nationale, en son par. 5.7, de veiller à ce que la stratégie de protection pour la gestion de situations d'exposition existante soit proportionnée aux risques radiologiques associés à l'occupation des bâtiments.
- 4.29. Dans les bâtiments qui présentent des niveaux élevés de rayonnements gamma, l'application de matériaux de protection sur les murs ou les sols peut contribuer à les réduire. Le tableau 1 [44] donne les valeurs des facteurs d'atténuation des rayonnements gamma qu'offrent divers matériaux de protection.
- 4.30. La CIPR [8] a indiqué que toute dose annuelle existante qui avoisinerait le seuil de 100 mSv justifierait quasi systématiquement une intervention. L'autorité nationale devrait envisager de rendre des mesures de protection obligatoires pour les logements et autres bâtiments à forts taux d'occupation qui présentent des niveaux de dose effective supérieurs à 100 mSv. Une solution possible, en dernière extrémité, consiste à détruire les bâtiments concernés et à reloger leurs occupants [8]. Compte tenu des lourdes conséquences socio-économiques qu'elle comporte de toute évidence, pareille intervention ne saurait être engagée sans avoir été mûrement réfléchie.

TABLEAU 1. EFFICACITÉ DES MATÉRIAUX DE PROTECTION : ÉPAISSEUR DU MATÉRIAU DE PROTECTION (EN MM) NÉCESSAIRE POUR OBTENIR L'ATTÉNUATION INDIQUÉE [44]

Marking to the second	Épaisseur du matériau de protection (en mm) nécessaire à l'obtention de facteurs d'atténuation donnés dans une fourchette allant de 0,9 à 0,1								
Matériau de protection	Facteur d'atténuation								
	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Plomb ($\rho = 11\ 300\ kg/m^3$)	0,9	2,3	4,0	6,3	9,3	13	18	26	38
Fer $(\rho = 7 \ 800 \ \text{kg/m}^3)$	6,1	11	17	23	29	37	46	59	81
Baryte ($\rho = 3\ 300\ kg/m^3$)	12	24	37	50	65	83	100	130	180
Baryte($\rho = 2 \ 800 \ \text{kg/m}^3$)	18	34	50	66	84	100	130	160	220
Béton ($\rho = 2 \ 300 \ \text{kg/m}^3$)	30	50	69	89	110	130	160	200	270
Brique pleine $(\rho = 1 \ 800 \ kg/m^3)$	46	72	100	130	160	190	230	280	370

RÉFÉRENCES

- L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE, AGENCE DE L'OCDE POUR [1] **AGENCE** INTERNATIONALE L'ÉNERGIE DE ATOMIOUE. COMMUNAUTÉ EUROPÉENNE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE, ORGANISATION INTERNATIONALE TRAVAIL. ORGANISATION DU **MARITIME** INTERNATIONALE. ORGANISATION MONDIALE SANTÉ. DE LA ORGANISATION PANAMÉRICAINE DE LA SANTÉ, PROGRAMME DES NATIONS UNIES POUR L'ENVIRONNEMENT, Principes fondamentaux de sûreté, collection Normes de sûreté de l'AIEA n° SF-1, AIEA, Vienne (2007).
- [2] AGENCE DE L'OCDE POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE. INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, COMMISSION EUROPÉENNE, ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE. ORGANISATION INTERNATIONALE DU TRAVAIL, ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ. ORGANISATION PANAMÉRICAINE DE LA SANTÉ. PROGRAMME DES NATIONS UNIES POUR L'ENVIRONNEMENT, Radioprotection et sûreté des sources de rayonnements : Normes fondamentales internationales de sûreté, n° GSR Part 3 de la collection Normes de sûreté de l'AIEA, AIEA, Vienne (2016).
- [3] UNITED NATIONS, Sources and Effects of Ionizing Radiation (2008 Report to the General Assembly), Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (2010).
- [4] COMMISSION INTERNATIONALE DE PROTECTION RADIOLOGIQUE, Recommandations 2007 de la Commission internationale de protection radiologique, Publication 103 de la CIPR, IRSN (2007).
- [5] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Protection Against Radon-222 at Home and at Work, Publication 65, Pergamon Press, Oxford (1993).
- [6] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon, Publication 115, Elsevier, Oxford (2010).
- [7] WORLD HEALTH ORGANIZATION, WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective, WHO, Geneva (2009).
- [8] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Protection of the Public in Situations of Prolonged Radiation Exposures, Publication 82, Pergamon Press, Oxford (1999).
- [9] ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ, ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE, PROGRAMME MIXTE FAO/OMS SUR LES NORMES ALIMENTAIRES, COMMISSION DU CODEX ALIMENTARIUS, Norme générale Codex pour les contaminants et les toxines présents dans les produits de consommation humaine et animale, Tableau I Radionucléides, CODEX STAN 193-1995, CCA, Rome (2013).

- [10] ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ, Directives de qualité pour l'eau de boisson, 4^e édition, OMS, Genève (2017).
- [11] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Radioprotection professionnelle, collection Normes de sûreté de l'AIEA n° RS-G-1.1, AIEA, Vienne (2004).
- [12] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Contrôle réglementaire des rejets radioactifs dans l'environnement, collection Normes de sûreté de l'AIEA n° WS-G-2.3, AIEA, Vienne (2018).
- [13] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management of Radioactive Waste from the Mining and Milling of Ores, IAEA Safety Standards Series No. WS-G-1.2, IAEA, Vienna (2002).
- [14] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Cadre gouvernemental, législatif et réglementaire de la sûreté, collection Normes de sûreté de l'AIEA n° GSR Part 1, AIEA, Vienne (2010).
- [15] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Measurement of Radioactivity in the Environment Air: Radon-222 Part 8: Methodologies for Initial and Additional Investigations in Buildings, ISO Standard 11665-8:2012, ISO, Geneva (2012).
- [16] UNITED NATIONS, Effects of Ionizing Radiation (2006 Report to the General Assembly), Annex E: Sources-to-Effects Assessment for Radon in Homes and Workplaces, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (2009).
- [17] UNITED NATIONS, Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly), Annex B: Exposures from Natural Radiation Sources, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (2000).
- [18] EUROPEAN COMMISSION, Radiation Protection 112, Radiological Protection Principles Concerning the Natural Radioactivity of Building Materials (1999), http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radiation_protection/doc/publication/112.pdf
- [19] INGERSOLL, J.G., A survey of radionuclide content and radon emanation rates in building materials used in the U.S., Health Phys. **45** (1983) 363–368.
- [20] JENSEN, C.L., STRAND, T., RAMBERG, G., RUDEN, L., ANESTAD, K., The Norwegian Radon Mapping and Remediation Program, IRPA, Madrid (2004).
- [21] EK, B., THUNHOLM, B., OSTERGREN, I., FALK, R., MJONES, L., Naturligt radioaktiva *ämnen*, arsenik och andra metaller i dricksvatten från enskilda brunnar (2008), http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/Global/Publikationer/Rapport/Stralskydd/2008/ssi-rapp-2008-15.pdf (résumé en anglais).
- [22] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Measurement of Radioactivity in the Environment Air: Radon-222 Part 4: Integrated Measurement Methods for Determining Average Activity Concentration Using Passive Sampling and Delayed Analysis, ISO Standard 11665-4:2012, ISO, Geneva (2012).

- [23] RADIATION PROTECTION INSTITUTE OF IRELAND, Action Plan to Identify and Remedy Irish Houses with Radon Concentrations above the National Reference Level (2006), http://www.epa.ie/pubs/reports/radiation/RPII Rad Action Plan 06.pdf
- [24] L'AUTORITÉ DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE, Plan national d'action 2011-2015 pour la gestion du risque lié au radon (2012), http://www.french-nuclear-safety.fr/Information/News-releases/ASN-s-national-action-plan-for-management-of-the-radon-risk
- [25] SWISS FEDERAL OFFICE OF PUBLIC HEALTH, National Action Plan concerning Radon, 2012 – 2020 (2011), http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00046/11649/ index.html?lang=en&download=NHzLpZeg7t,lnp6I0NTU042I2Z6ln1ad1IZn4Z2qZpn O2Yuq2Z6gpJCKdH14f2ym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A--
- [26] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Protecting People and Families from Radon: A Federal Action Plan for Saving Lives (2011), http://www.epa.gov/radon/pdfs/Federal Radon Action Plan.pdf
- [27] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Radiological Protection against Radon Exposure, Publication 126, Elsevier, Oxford (2014).
- [28] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, The Optimisation of Radiological Protection, Publication 101b, Elsevier, Oxford (2006).
- [29] ORGANISATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION, Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnage et d'essais, ISO/IEC 17025:2005, ISO, Genève (2005).
- [30] NEZNAL, M., NEZNAL, M., ŠMARDA, J., "Radon infiltration risk from the ground in Chabry, Prague", Radon Investigations in Czechoslovakia (BARNET, I., Ed.), Vol. 2, Czech Geological Survey, Prague (1991) 34-39.
- [31] NEZNAL, M., NEZNAL, M., MAOTLIN, M., BARNET, I., MIKSOVA, J., The New Method for Assessing the Radon Risk of Building Sites, Czech Geological Survey Special Papers 16, Czech Geological Survey, Prague (2004).
- [32] MCLAUGHLIN, J., An overview of thoron and its progeny in the indoor environment, Radiat. prot. Dosim. 141 (2010) 316–321.
- [33] GUO, Q., SHIMO, M., IKEBE, Y., MINATO, S., The study of thoron and radon progeny concentrations in dwellings in Japan, Radiat. prot. Dosim. 45 (1992) 357–359.
- [34] TOKONAMI, S., et al, Radon and thoron exposures for cave residents in Shanxi and Shaanxi provinces, Radiat. Res. **162** (2004) 390–396.
- [35] YAMASAKI, T., LIDA, T., Measurements of thoron progeny concentration using a potential alpha-energy monitor in Japan, Health Phys. 68 (1995) 840–844.
- [36] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Measurement of Radioactivity in the Environment Soil Part 1: General Guidelines and Definitions, ISO Standard 18589-1:2005, ISO, Geneva (2005).
- [37] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Measurement of Radioactivity in the Environment Soil Part 2: Guidance for the Selection of the Sampling Strategy, Sampling and Pre-treatment of Samples, ISO Standard 18589-2:2007, ISO, Geneva (2007).

- [38] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Measurement of Radioactivity in the Environment Soil Part 3: Measurement of Gamma-Emitting Radionuclides, ISO Standard 18589-3:2007, ISO, Geneva (2007).
- [39] KNOLL, G.F., Radiation Detection and Measurement, 4th edn, J. Wiley and Sons, New York (2011).
- [40] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL ORGANIZATION, Nuclear Instrumentation — Measurement of Gamma-Ray Emission Rates of Radionuclides — Calibration and Use of Germanium Spectrometers, IEC Standard 61452, IEC, Geneva (1995).
- [41] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL ORGANIZATION, Radiation Protection Instrumentation — Measurement of Discrete Radionuclides in the Environment — In Situ Photon Spectrometry System Using a Germanium Detector, IEC Standard 61275, IEC, Geneva (2013).
- [42] ÅKERBLOM, G., Radon Legislation and National Guidelines, SSI Report No. 99:18, Swedish Radiation Protection Institute, Stockholm (1999).
- [43] Trevisi, R., Risica, S., D'Alessandro, M., Paradiso, D., Nuccetelli, C., Natural radioactivity in building materials in the European Union: a database and an estimate of radiological significance, J. Environ. Radioact. **105** (2012) 11–20.
- [44] CZECH OFFICE FOR STANDARDS, Protection of Buildings against Radon and Gamma Radiation from Building Materials, CSN 73 0602, Czech Office for Standards, Metrology and Testing, Prague (2006).

Annexe I

ÉTUDES CONSACRÉES AU RADON ET CARTOGRAPHIE DES ZONES SUJETTES AU ²²²RN

- I–1. Les mesures de gestion des risques de santé publique liés au radon doivent être déterminées sur la base des données dont dispose un pays concernant les concentrations de radon relevées dans un environnement intérieur. Plusieurs instances internationales ont souligné qu'il fallait, pour pouvoir déterminer l'exposition d'une population imputable au radon, comprendre les raisons pour lesquelles ces concentrations varient d'un endroit à l'autre [I–1, I–2]. D'où la nécessité de réaliser des études sur le radon et de dresser une cartographie du ²²²Rn. C'est à cette tâche que s'est attelée l'OMS, dans le cadre d'une enquête couvrant plusieurs pays [I–3].
- I–2. Les concentrations élevées de ²²²Rn observées dans un environnement intérieur résultent presque toujours de la présence d'uranium dans le sol. Il arrive aussi que les matériaux de construction soient à l'origine de fortes concentrations de radon dans l'air intérieur, mais il s'agit là d'une situation peu courante. Des concentrations relativement importantes de ²²²Rn sont associées à certains types de substrats rocheux et de dépôts non consolidés, notamment des granits, des roches phosphatées et des schistes riches en matières organiques. La teneur en uranium n'est pas le seul facteur qui détermine le taux de ²²²Rn émis par les roches : la perméabilité, l'étendue de la fracturation et de la faille, de même que l'érosion, jouent également un rôle non négligeable. L'influence des activités humaines telles que l'exploitation minière doit être elle aussi prise en considération. Une fois le gaz ²²²Rn libéré, sa migration vers la surface obéit à un certain nombre de processus complexes. La façon dont le gaz ²²²Rn passe du sol à l'air intérieur dépend de plusieurs facteurs qui sont parfois très différents d'un bâtiment à l'autre et qui peuvent évoluer avec le temps.
- I–3. Les concentrations de ²²²Rn dans les gaz du sol peuvent fluctuer d'une région à l'autre en fonction des concentrations d'uranium dans les roches et les sols, et selon le déplacement des gaz dans et entre les structures géologiques [I–4]. Ces mêmes facteurs multiples et variés se conjuguent, à bien moindre échelle, avec la construction et l'utilisation de chaque bâtiment, déterminant ainsi sa concentration de ²²²Rn. Les concentrations de ²²²Rn peuvent grandement varier d'un bâtiment à l'autre, mais aussi d'heure en heure et de jour en jour, au gré de facteurs climatiques tels que la vitesse et la direction du vent, la pression atmosphérique et la température [I–5, I–6]. Le comportement des occupants peut également influer sur les concentrations de ²²²Rn à l'intérieur d'un bâtiment.

- I–4. Les concentrations de ²²²Rn dans les bâtiments dépendent de la concentration de radon dans les gaz du sol et de la perméabilité de ce dernier, ainsi que de la manière dont les bâtiments ont été construits et de l'usage auquel ils sont destinés. Des études ont cherché à corréler les concentrations de ²²²Rn dans les gaz du sol avec les concentrations de ²²²Rn relevées à l'intérieur des bâtiments. Elles n'ont guère été concluantes, car il n'a pas été tenu compte de tous les facteurs qui déterminent les concentrations de radon dans un environnement intérieur
- I-5. Eu égard aux grandes variations que peuvent présenter ses concentrations dans un environnement intérieur, le ²²²Rn doit faire l'objet d'études minutieuses pour cerner l'ampleur et la nature du problème qu'il constitue dans un pays ou une région. La cartographie constitue en général le meilleur moyen de faire ressortir les résultats ainsi obtenus. Les travaux de Synnott et Fenton [I-7] et de Dubois [I-8] ont passé au crible les études consacrées au ²²²Rn et examiné de près la cartographie du radon en Europe. Il est apparu que les cartes ainsi dressées avaient été établies selon des méthodes très disparates qui rendaient la comparaison entre les pays quasiment impossible, tant et si bien qu'un vaste projet européen de cartographie du radon a été lancé en 2006. Une version provisoire de la carte européenne du radon présent dans des environnements intérieurs (projet qui n'est toujours pas terminé étant donné que des études sont encore en cours dans de nombreux pays) a été publiée [I-9 à I-11]. Le tableau I-1 [I-8, I-12 à I-46] indique, de manière synthétique, les études nationales consacrées au ²²²Rn dont Dubois a fait état. Ouantité de données sur le radon ont été obtenues depuis la parution du doc. de réf. [I-8]. De nombreux pays publient par ailleurs des données sur les concentrations locales de ²²²Rn recueillies, dans des environnements intérieurs, aux niveaux régional et local. À l'échelon mondial, les données proviennent de l'UNSCEAR, les dernières en date ayant été communiquées en 2006 [I-47].
- I-6. Les études consacrées au ²²²Rn peuvent être axées soit sur la population il s'agit ici de donner des informations concernant l'exposition des personnes due au ²²²Rn -, soit sur la zone géographique elles s'intéressent dans ce cas aux concentrations types de ²²²Rn dans la zone géographique examinée, indépendamment de la population. Bien que ces travaux soient de toute évidence liés, ils n'en sont pas moins distincts. Une étude axée sur la population permet de comprendre les conséquences des expositions imputables au ²²²Rn en termes de santé publique. Une carte s'avère nécessaire lorsqu'il faut décider s'il y a lieu de mettre en place des mesures préventives concernant le ²²²Rn dans les nouvelles constructions, ou pour piloter des études qui ont pour but de rechercher des bâtiments existants présentant de fortes concentrations de ²²²Rn. Une étude

TABLEAU I–1. PROGRAMMES DE CARTOGRAPHIE DES CONCENTRATIONS DE ²²²RN RELEVÉES DANS UN ENVIRONNEMENT INTÉRIEUR EN EUROPE *(RECENSÉS DANS LES TRAVAUX DE DUBOIS [I–8])*

Pays	Doc. de réf.	État	Doc. de réf.	
Allemagne	[I-22]	Lituanie	[I-28]	
Autriche	[I–12]	Luxembourg	[I-29]	
Belgique	[I-13]	Malte	[I-30]	
Chypre	[I-15]	Norvège	[I-32]	
Croatie	[I-14]	Pays-Bas	[I-31]	
Danemark	[I-17]	Pologne	[I-33]	
Espagne	[I-39]	Portugal	[I-34]	
Estonie	[I-18]	République tchèque	[I-16]	
Finlande	[I–19, I–20]	Roumanie	[I-35]	
France	[I-21]	Royaume-Uni	[I–43 à I–46]	
Grèce	[I-23]	Serbie (Vojvodina uniquement)	[I–36]	
Hongrie	[I-24]	Slovaquie	[I-37]	
Irlande	[I-25]	Slovénie	[I-38]	
Italie	[I–26]	Suède	[I-40]	
L'Ex-République yougoslave de Macédoine	[I-42]	Suisse	[I-41]	
Lettonie	[I–27]			

axée sur la population pourrait ainsi prévoir d'effectuer des mesures dans un bâtiment sur mille situé dans la zone d'intérêt, que ces bâtiments soient proches ou éloignés les uns des autres. Une étude par zone suppose quant à elle de prendre un nombre bien précis de mesures par unité géographique, quel que soit le nombre de bâtiments qu'elle compte.

I-7. Les programmes d'échantillonnage dont il est fait état sont simples et logiques. Cependant, dès que l'on effectue des mesures qui ne sont pas issues

d'un programme d'échantillonnage formel, la situation se complique. Si le mesurage est sollicité et financé par les propriétaires des bâtiments, il est probable que des différences socio-économiques apparaîtront entre ceux qui acceptent de faire procéder à ces mesures et ceux qui s'y refusent.

I–8. Pour élaborer des cartes de concentrations de ²²²Rn, les résultats doivent être présentés selon des unités géographiques, quelles qu'elles soient. Comme indiqué ci-dessus, les concentrations de ²²²Rn sont déterminées en dernier ressort par des facteurs géologiques ainsi que par la façon dont les bâtiments ont été construits et par l'usage qui en est fait. Ces cartes seront sans doute jugées plus commodes si elles sont présentées selon le découpage administratif, en se référant par exemple aux délimitations des collectivités locales ou en les situant sur une simple grille de maillage rectangulaire. La cartographie qui reprend les délimitations des collectivités locales est plus pratique en termes de réglementation. Les processus physiques sur lesquels elle repose donnent à penser que de meilleurs résultats seraient obtenus en combinant les données relatives à la même unité géologique. Cela étant, la probabilité de trouver de fortes concentrations de ²²²Rn dans un environnement intérieur peut aussi grandement varier dans une même unité géologique.

EXEMPLE DE L'APPROCHE SUIVIE AU ROYAUME-UNI POUR CARTOGRAPHIER LE ²²²RN

I–9. L'expérience acquise lors de l'établissement de la cartographie du ²²²Rn au Royaume-Uni apporte un éclairage sur certaines de ces questions. Les résultats des études initiales axées sur la population ont été présentés sous la forme de cartes de concentrations moyennes de ²²²Rn composées de carrés de 10 km de côté. De nombreux carrés ne comportaient toutefois aucune information ; pour pouvoir définir une politique relative au ²²²Rn et fixer les priorités des campagnes à mener en la matière [I–48], il fallait donc à l'évidence dresser une carte plus complète et plus détaillée. Il a dès lors été décidé de mesurer les concentrations de ²²²Rn afin de les cartographier avec précision, en commençant par les régions du Royaume-Uni qui affichaient les valeurs les plus élevées. Des mesures supplémentaires des concentrations de ²²²Rn ont été réalisées dans ces zones, de manière à disposer d'au moins cinq résultats pour chaque carré de 5 km de côté dans la grille de maillage.

I-10. Il est apparu que la répartition des résultats des mesures du ²²²Rn dans les carrés de la grille de maillage était proche de la log-normalité. Pour caractériser cette répartition, il a suffi de déterminer deux paramètres pour chaque carré

de la grille, à savoir la moyenne géométrique et l'écart-type géométrique. De nouvelles techniques ont été mises au point pour faire en sorte qu'en cas de résultats insuffisants sur un carré particulier, les données de carrés adjacents puissent être utilisées afin de calculer ces paramètres [I–49, I–50]. Les résultats sont alors présentés sous forme de cartes de probabilité, qui indiquent que le niveau d'intervention pour le radon sera vraisemblablement dépassé dans telle habitation située dans tel carré de la grille de maillage.

I–11. Dans certaines régions, des campagnes intensives de mesurage visant à repérer les habitations présentant de fortes concentrations de ²²²Rn ont permis d'engranger une moyenne de 15 résultats pour cet élément par carré de 1 km de côté, résultats dont la répartition était cependant très inégale. La densité de ces résultats est telle qu'elle permet de dresser une cartographie plus détaillée des concentrations de ²²²Rn, avec une résolution de 1 km de côté pour chaque carré de la grille. Il s'est avéré que les méthodes mises au point pour cartographier les concentrations de ²²²Rn avec une résolution de 5 km ne convenaient pas pour une résolution de 1 km, les mesures étant trop inégalement réparties à cette échelle plus fine. Une nouvelle méthode d'analyse des données a été imaginée pour permettre de cartographier des concentrations de ²²²Rn sur une grille de maillage composée de carrés de 1 km de côté [I–51].

I–12. Les cartes des concentrations de ²²²Rn établies au Royaume-Uni recensent, pour l'essentiel, des mesures de ²²²Rn regroupées par mailles rectangulaires. D'autres cartes ont été élaborées en regroupant toutes les mesures relevées dans la même unité géologique et uniformément réparties [I–52]. Les délimitations des unités géologiques ont été reprises à partir de cartes géologiques numériques.

I–13. Les deux méthodes de cartographie, celle qui repose sur le quadrillage et celle fondée sur la géologie, ont leurs avantages et leurs inconvénients. Dès lors que la probabilité de trouver de fortes concentrations de ²²²Rn dans un environnement intérieur diffère manifestement selon les unités géologiques, l'approche consistant à regrouper les résultats par unité géologique devrait de toute évidence être privilégiée. Cela étant, d'importantes variations des concentrations de ²²²Rn dans un environnement intérieur sont souvent constatées au sein d'une même unité géologique, variations dont la cartographie géologique ne rend pas compte. La cartographie par quadrillage ignore les différences entre les unités géologiques, mais peut faire ressortir des variations au sein des unités géologiques qui n'apparaissent pas sur les cartes des concentrations de ²²²Rn établies à partir des données géologiques.

- I–14. Pour savoir s'il est possible de combiner les différents atouts de la cartographie géologique et de la cartographie par quadrillage, les résultats des mesures de concentrations de ²²²Rn dans les habitations sont d'abord regroupés par unité géologique. La méthode de maillage par carrés de 1 km de côté est ensuite appliquée pour cartographier séparément dans chaque unité les variations des concentrations de ²²²Rn observées dans un environnement intérieur. Les différentes cartes de concentrations de ²²²Rn relevées dans des environnements intérieurs pour toutes les unités géologiques sont ensuite combinées de manière à couvrir l'ensemble de la zone étudiée [I–53].
- I-15. Les programmes de cartographie des concentrations de ²²²Rn dans un environnement intérieur intéressent également d'autres pays européens (voir tableau I-1), et les techniques utilisées à cet effet dans un certain nombre d'entre eux ont au demeurant été passées en revue [I-7]. Les États-Unis d'Amérique possèdent eux aussi une expérience en la matière [I-54]. Les techniques de cartographie ont beaucoup évolué ces dernières années, ce qui s'est traduit par une plus grande disponibilité et une meilleure connaissance des systèmes d'information géographique et des méthodes géostatistiques.

RÉFÉRENCES RELATIVES À L'ANNEXE I

- [I-1] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Protection Against Radon-222 at Home and at Work, Publication 65, Pergamon Press, Oxford (1993).
- [I–2] WORLD HEALTH ORGANIZATION, WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective, WHO, Geneva (2009).
- [I-3] ZEEB, H., Survey on Radon Guidelines, Programmes and Activities, WHO Report WHO/HSE/RAD/07.01, WHO, Geneva (2007).
- [I-4] BARNET, I., PACHEROVÁ, P., NEZNAL, M., NEZNAL, M., Radon in geological environment - Czech experience, Special Papers No. 19, Czech Geological Survey, Prague (2008).
- [I–5] ROBINSON, A.L., SEXTRO, R.G., Radon entry into buildings driven by atmospheric pressure fluctuations, Environ. Sci. Technol. **31** 6 (1997) 1742–1748.
- [I–6] SUN, Q., TOKONAMI, S., YAMADA, Y., AKIBA, S., Main meteorological parameters to influence indoor radon level, Radioisot. **51** 3 (2002) 120–126.
- [I-7] SYNNOTT, H., FENTON, D., An Evaluation of Radon Reference Levels and Radon Measurement Techniques and Protocols in European Countries (2005), https://www.epa.ie/pubs/reports/radiation/RPII ERRICA Measure Report 05.pdf
- [I–8] DUBOIS, G., An Overview of Radon Surveys in Europe (2005), http://rem.jrc.ec.europa.eu/RemWeb/publications/EUR_RADON.pdf

- [I–9] TOLLEFSEN, T., GRUBER, V., BOSSEW, P., DE CORT, M., Status of the European indoor radon map, Radiat. prot. Dosim. 145 (2011) 110–116.
- [I-10] DE CORT, M., GRUBER, V., TOLLEFSEN, T., BOSSEW, P., JANSSENS, A., Towards a European atlas of natural radiation: Goal, status and future perspectives, Radioprot. 46 (2011) S737–S743.
- [I–11] GRUBER, V., TOLLEFSEN, T., BOSSEW, P., DE CORT, M., The European indoor radon map and beyond, Carpathian J. Earth & Environ. Sci. 8 (2013) 169–176.
- [I–12] FRIEDMANN, H., et al., "The Austrian radon project", Sci. Total Environ. **272** 1–3 (2001) 211–212 (abstract).
- [I-13] VANMARCKE, H., MOL, H., PARIDAENS, J., EGGERMONT, G., "Exposure of the Belgian Population to Ionizing Radiation", IRPA 11: 11th international congress of the International Radiation Protection Association (Proc. Int. Congr. Madrid, 2004) SENDA, Madrid (2004).
- [I–14] RADOLIC, V., et al., National survey of indoor radon levels in Croatia, J. Radioanal. Nucl. Chem. 269 (2006) 87–90.
- [I-15] SARROU, I., PASHILIDIS, I., Radon Levels in Cyprus, J. Environ. Radioact. 68 (2003) 269-277.
- [I-16] HULKA, J., THOMAS, J., "National radon programme: 20 years of experience in Czech Republic", IRPA 11: 11th international congress of the International Radiation Protection Association (Proc. Int. Congr. Madrid, 2004) SENDA, Madrid (2004).
- [I–17] ANDERSEN, C.E., ULBAK, K., DAMKJÆR, A., KIRKEGAARD, P., GRAVESEN, P., Mapping indoor radon-222 in Denmark: Design and test of the statistical model used in the second nationwide survey, Sci. Total Environ. 272 1–3 (2001) 231–241.
- [I–18] PAHAPILL, L., RULKOV, A., RAJAMÄE, R., ÅKERBLOM, G., Radon in Estonian Dwellings, Results from a National Radon Survey, SSI Report No. 2003:16, Swedish Radiation Protection Authority, Stockholm (2003).
- [I-19] VALMARI, T., MÄKELÄINEN, I., REISBACKA, H., ARVELA, H., Suomen Radonkartasto — Radon Atlas of Finland, STUKA245, Oy Edita Ab., Helsinki (2010).
- [I–20] MÄKELÄINEN, I., VALMARI, T., REISBACKA, H., KINNUNEN, T., ARVELA, H., "Indoor radon and construction practices in Finnish homes from the 20th to the 21st century", Third European IRPA Congress (Proc. Int. Congr. Helsinki, 2010) Nordic Society for Radiation Protection, Helsinki (2011) 561-569.
- [I-21] BILLON, S., et al, French population exposure to radon, terrestrial gamma and cosmic rays, Radiat. prot. Dosim. 113 3 (2005) 314–320.
- [I–22] LEHMANN, R., KEMSKI, J., SIEHL, A., STEGEMANN, R., VALDIVIA-MANCHEGO, M., The regional distribution of indoor radon concentration in Germany, Int. Congr. Ser. 1225 (2002) 55–61.
- [I-23] CLOUVAS, A., XANTHOS, S., ANTONOPOULOS-DOMIS, M., A combination study of indoor radon and in situ gamma spectrometry measurements in Greek dwellings, Radiat. Prot. Dosim. 103 4 (2003) 363–366.
- [I–24] HÁMORI, K., TÓTH, E., KÖTELES, G., PÁL, L., A Magyarországi lakások radonszintje (1994–2004), Egészstud. 48 (1994) 283–299.
- [I–25] FENNELL, S.G., et al., Radon in Dwellings, The Irish National Radon Survey, RPII-02/1, Radiological Protection Institute of Ireland, Dublin (2002).

- [I–26] BOCHICCHIO, F., et al., Results of the representative Italian national survey on radon indoors, Health Phys. 71 5 (1996) 741–748.
- [I–27] DAMBIS, M., "Radon in Latvia's dwellings", Radiation and Society: Comprehending Radiation Risk (Proc. Int. Conf. Paris, 1994) IAEA, Vienna (1996) 379–382.
- [I–28] MORKUNAS, G., ÅKERBLOM, G., "The outcome of the Lithuanian radon survey", Sci. Total Environ. 272 (2001) 243–244 (abstract).
- [I–29] KIES, A., FEIDER, M., BIELL, A., Indoor radon concentrations in the Grand Duchy of Luxembourg, Ann. Assoc. Belg. Radioprot. 19 (1994) 189–201.
- [I-30] MIFSUD, I., SAMMUT, M., A survey on radon levels in local dwellings, Xjenza 4 (1999) 40-41.
- [I–31] STOOP, P., GLASTRA, P., HIEMSTRA, Y., DE VRIES, L., LEMBRECHTS, J., Results of the Second Dutch National Survey on Radon in Dwellings, RIVM Report No. 610058006, National Institute of Public Health and the Environment, Bilthoven, Netherlands (1998).
- [I–32] STRAND, T., GREEN, B.M.R., LOMAS, P.R., Radon in Norwegian dwellings, Radiat. Prot. Dosim. 45 (1992) 503–508.
- [I–33] STAWARZ, O., ISAJENKO, K., LIPINSKI, P., MAMONT-CIESLA, K., The radon concentration investigations in dwellings of Rzeszow area with the aim of completing missing data in radon atlas of Poland, Activity Report 2008-2009, 25-31, Central Laboratory for Radiological Protection, Warsaw (2010).
- [I–34] FAÍSCA, M.C., TEIXEIRA, M.M.G.R., BETTENCOURT, A.O., Indoor radon concentrations in Portugal — a national survey, Radiat. Prot. Dosim. 45 (1992) 465–467.
- [I–35] CUCULEANU, V., SONOC, S., GEORGESCU, M., Radioactivity of radon and thoron daughters in Romania, Radiat. Prot. Dosim. 45 (1992) 483–485.
- [I–36] CURCIC, S., et al., "The first radon map of Vojvodina", IRPA 11: 11th international congress of the International Radiation Protection Association (Proc. Int. Congr., Madrid, 2004) SENDA, Madrid (2004).
- [I–37] VICANOVÁ, M., DURCÍK, M., NIKODEMOVÁ, D., Radiation Load from Radon Exposure in Slovakia (1999), http://www.iaea.org/inis/collectionNCLCollectionStore/ Public/30/017/30017847.pdf
- [I–38] KRIŽMAN, M., ILIC, R., SKVARC, J., JERAN, Z., "A survey of indoor radon concentrations in dwellings in Slovenia", Proceedings of the IRPA Regional Congress (Proc. Congr. Portorož, 1995), (GLAVIC-CINDRO, D., Ed.), Institut J. Stefan, Ljubljana (1995) 66-70.
- [I–39] QUINDÓS PONCELA, L.S., et al., Natural external gamma radiation map (MARNA) and indoor radon levels in Spain, Environ. Int. 29 (2004) 1091-1096.
- [I–40] SWEDISH RADON COMMISSION, Proposal for a New Radon Programme for Sweden, The Swedish Radon 2000 Commission's Report SOU 001:7, Swedish Government Offices, Stockholm (2001).
- [I–41] SWISS FEDERAL OFFICE OF PUBLIC HEALTH, Jahresbericht 2013 der Abteilung Strahlenschutz (2013), http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00043/00065/02236/index.html?lang=de

- [I–42] REPUBLIC INSTITUTE FOR HEALTH PROTECTION, Radon in Living and Working Environment, Report No. 40096895, RIHP, Skopje (1998).
- [I–43] GREEN, B.M.R., MILES, J.C.H., BRADLEY, E.J., REES, D.M., Radon Atlas of England and Wales, NRPB-W26, National Radiological Protection Board, Chilton (2002).
- [I–44] MILES, J.C.H., et al., Indicative Atlas of England and Wales, Report No. HPA-RPD-033, Health Protection Agency, Didcot (2007).
- [I–45] MILES, J.C.H., et al., Indicative Atlas of Radon in Scotland, Report No. HPA-CRCE-023, Health Protection Agency, London (2011).
- [I-46] GREEN, B.M.R., LARMOUR, R., MILES, J.C.H., REES, D.M., LEDGERWOOD, F.K., Radon in Dwellings in Northern Ireland, Report No. HPA-RPD-061, Health Protection Agency, Chilton (2009).
- [I–47] UNITED NATIONS, Effects of Ionizing Radiation (2006 Report to the General Assembly), Annex E: Sources-to-Effects Assessment for Radon in Homes and Workplaces, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (2009).
- [I–48] KENDALL, G.M., GREEN, B.M.R., MILES, J.C.H., DIXON, D.W., The development of the UK radon programme, J. Radiol. Prot. 25 4 (2005) 475–492.
- [I-49] MILES, J.C.H., Mapping the proportion of the housing stock exceeding a radon reference level, Radiat. Prot. Dosim. 56 (1994) 207–210.
- [I–50] MILES, J.C.H., Mapping radon-prone areas by lognormal modelling of house radon data, Health Phys. 74 (1998) 370–378.
- [I–51] MILES, J.C.H., Development of maps of radon-prone areas using radon measurements in houses, J. Hazard. Mater. 61 (1998) 53–58.
- [I-52] APPLETON, J.D., BALL, T.K., "Geological radon potential mapping", Geoenvironmental Mapping: Methods, Theory and Practice (BOBROWSKY, P. T., Ed.), Balkema, Rotterdam (2002) 577-613.
- [I–53] MILES, J.C.H., APPLETON, J.D., Mapping variation in radon potential both between and within geological units, J. Radiol. Prot. **25** (2005) 257–276.
- [I–54] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Map of Radon Zones (2012), http://www.epa.gov/radon/zonemap.html

Annexe II

TECHNIQUES DE MESURE DU ²²²RN ET DU ²²⁰RN

TECHNIQUES DE MESURE DU ²²²RN

II-1. Les risques sanitaires liés à l'inhalation de radon et de ses descendants dépendent du mélange de radionucléides présent dans l'air inhalé. Les radionucléides qui émettent des particules alpha appellent une attention particulière, car ces particules provoquent, à l'intérieur de l'organisme humain, davantage de dommages biologiques que les particules bêta ou les rayons gamma. Plus que le gaz radon proprement dit, ce sont en règle générale ses descendants qui s'avèrent les plus dangereux, étant donné qu'ils peuvent se trouver piégés dans les poumons, contrairement au gaz radon inhalé qui, lui, est ensuite ré-exhalé. Il a été démontré que la concentration de gaz radon était le plus souvent un bon indicateur du risque auquel il est associé [II-1]. Si important soit-il de mesurer les descendants du radon, le fait est que, parmi la panoplie de moyens concrets de protection radiologique, le choix se porte le plus souvent sur le mesurage des concentrations de gaz radon.

II-2. Le risque de développer un cancer du poumon après avoir été exposé au radon dépend de la durée cumulée d'exposition sur un grand nombre d'années. Il serait bien commode de pouvoir estimer cette exposition grâce à un rapide calcul. Malheureusement, les chiffres que livrent les mesures du radon peuvent être trompeurs, car sa concentration peut varier, parfois de manière assez importante, d'heure en heure, de jour en jour et de mois en mois, en fonction de facteurs climatiques et autres [II–2 à II–4]. Les mesures ponctuelles [II–5], à court terme [II-6] ou en continu [II-7], des concentrations de radon peuvent s'avérer utiles à des fins de dépistage et de diagnostic, ou pour déterminer l'amplitude totale de leur variation dans le temps. Il faut néanmoins connaître la concentration d'activité moyenne du radon à long terme, ou intégrée sur une longue période, pour pouvoir évaluer les risques sanitaires. Dans l'absolu, les concentrations de radon devraient être mesurées sur une année complète, afin de couvrir les éventuelles variations saisonnières. La concentration d'activité moyenne du radon varie d'une année à l'autre [II-8]. Il peut cependant être malvenu de laisser des détecteurs dans un logement sur une période aussi longue : outre que cela pourrait nuire à leur efficacité, les propriétaires risqueraient ne pas vouloir attendre les résultats aussi longtemps. Aussi les mesures s'étalent-elles généralement sur plusieurs mois, la moyenne annuelle intégrant des facteurs de correction établis sur la base de variations saisonnières types. Plusieurs auteurs se sont penchés

sur les schémas des variations saisonnières des concentrations de ²²²Rn [II–9 à II–12]. Ces concentrations sont dans la plupart des cas plus élevées durant les mois les plus froids ; dans certains États, elles sont d'ailleurs mesurées en hiver, par prudence.

II-3. Il est important de suivre des protocoles de mesure qui soient bien conçus et clairement détaillés [II-4]. Au niveau international, une norme relative aux méthodes de test du ²²²Rn a été publiée par l'Organisation internationale de normalisation ; elle se compose de différentes parties, chacune adaptée à une situation et à des attentes particulières et tenant compte des objectifs connexes en matière de qualité des données [II-3, II-5 à II-7, II-13 à II-20]. Aux États-Unis d'Amérique, l'Agence de protection de l'environnement a ainsi publié une série de recommandations en la matière [II-21] et d'autres pays, notamment le Royaume-Uni [II-22] et la France [II-23, II-24] ont également établi des orientations. Les États ont pour la plupart recommandé, pour évaluer l'exposition, de mesurer la concentration de ²²²Rn sur plusieurs mois et de la comparer au niveau de référence. Un mesurage à plus court terme est néanmoins envisageable, à condition de respecter des protocoles rigoureux pour l'interprétation des résultats. Retenue dans un certain nombre de pays [II-21, II-25], cette approche permet de savoir rapidement si les concentrations d'activité du ²²²Rn sont très élevées ou très faibles. Pour l'instant, il n'est cependant pas possible d'exploiter les informations tirées de ces mesures pour procéder à des comparaisons avec les niveaux de référence. D'autre part, les concentrations d'activité du ²²²Rn peuvent présenter des variations importantes d'une année sur l'autre dans un bâtiment donné [II-26], mais il est rare que l'on puisse effectuer des mesures tout au long de l'année [II-16], sauf à des fins d'études épidémiologiques ou de recherche.

II–4. Les différents types de détecteurs utilisés pour le ²²²Rn sont brièvement décrits dans les sections qui suivent. Tous ces appareils fonctionnent sur un même principe, à savoir la détection des rayons alpha ou des rayons gamma émis par le ²²²Rn ou ses descendants. Les techniques de mesure du ²²²Rn ont été passées au crible dans une publication [II–20, II–27].

II–5. Il existe deux types de détecteurs de ²²²Rn : les uns sont actifs, les autres passifs. Les détecteurs passifs ne nécessitent aucune alimentation électrique et sont donc plus indiqués pour une utilisation de grande envergure. Les concentrations de ²²²Rn dans les habitations ont été mesurées à l'aide de détecteurs solides de traces nucléaires ou de détecteurs à charbon actif, qui se rangent tous deux dans la catégorie des détecteurs passifs.

DÉTECTEURS SOLIDES DE TRACES NUCLÉAIRES

II-6. Le détecteur solide de traces nucléaires se présente le plus souvent comme un détecteur plastique placé dans un petit boîtier. Le gaz radon se diffuse dans le boîtier et se désintègre, émettant des particules alpha qui laissent des traces de détérioration dans le détecteur plastique. Le processus utilisé pour déterminer la quantité de radon à laquelle le détecteur a été exposé consiste à attaquer le plastique au moyen d'une solution caustique, ce qui produit des traces là où il a été endommagé par le rayonnement dû aux particules alpha. Les traces peuvent être comptées automatiquement au microscope ou au moyen d'un scanner de diapositives, par exemple. Le plastique sensible le plus couramment utilisé est le polycarbonate de diglycol allylique, également connu sous le nom de CR-39. L'une des premières descriptions du principe expliqué ci-dessus a été donnée par Geiger dans le doc. de réf. [II-28]. Un exposé détaillé des applications des détecteurs solides de traces nucléaires figure dans le doc. de réf. [II-29] et une norme internationale encadre leur utilisation [II-6].

II-7. Les détecteurs solides de traces nucléaires sont des appareils petits, bon marché, simples, non toxiques et sans danger. Ils peuvent être envoyés par la poste avec des instructions concernant le lieu où ils doivent être placés et les modalités de retour. Pour les mesures effectuées dans les habitations en vue d'évaluer l'exposition de leurs occupants, deux détecteurs sont généralement installés, l'un dans une chambre occupée, l'autre dans la pièce principale. Ils sont le plus souvent laissés en place pendant trois mois au moins, et sont ensuite retournés aux fins de traitement des données recueillies. Dans certains pays, l'exposition des occupants due au radon et l'exposition éventuelle due aux niveaux de radon en sous-sol sont évaluées différemment : les détecteurs sont placés dans une pièce occupée située au plus bas de la bâtisse, ainsi qu'au sous-sol (cave ou autre).

II-8. Les détecteurs solides de traces nucléaires sont pour la plupart dotés de filtres pour éviter que les descendants du radon ne viennent perturber le signal. Certains appareils sont cependant de conception rudimentaire et détectent aussi bien le gaz radon que ses descendants. Loin d'être un avantage, ces détecteurs « ouverts » sont en réalité très sensibles à divers facteurs (la lumière du jour et la poussière, par exemple) qui influent sur la proportion de descendants détectée. Il existe aussi des détecteurs ouverts qui peuvent être fermés pendant la période de mesurage ; dans ce cas, il faudra veiller à noter la durée d'exposition (c'est-à-dire le temps pendant lequel le détecteur est ouvert).

II-9. Les rayonnements émis par le ²²⁰Rn peuvent affecter les résultats d'un certain nombre de détecteurs solides de traces nucléaires fermés et de la totalité

des appareils ouverts [II–30]. C'est là leur défaut, car cela nuit à la précision des mesures des concentrations de ²²²Rn. Les détecteurs fermés privilégient, s'agissant de la durée de pénétration du ²²²Rn, une période radioactive qui est longue par rapport à la demi-vie du ²²⁰Rn (55,6 secondes), mais courte par rapport à la demi-vie du ²²²Rn (3,82 jours). Si les détecteurs remplissent ce critère, le ²²⁰Rn se désintègre presque entièrement avant de parvenir dans le détecteur ; en revanche, le ²²²Rn ne décroît pas sensiblement avant de pénétrer dans le détecteur.

Les détecteurs de traces gravées présentent de nombreux avantages, mais il convient de prêter une attention particulière à leur qualité en termes d'utilisation. Il arrive en effet que le plastique réagisse différemment aux attaques des particules alpha selon les lots et soit en outre très sensible aux conditions dans lesquelles le processus de gravage des traces intervient [II-31]. Aussi les laboratoires qui ont entrepris depuis peu de se doter d'installations de production et de traitement pour les détecteurs de traces gravées éprouvent-ils souvent des difficultés à atteindre un haut degré de précision. Une solution permettant de surmonter au mieux ces obstacles consiste à passer auprès d'un laboratoire agréé ou homologué un marché garantissant toutes les prestations relatives à la fourniture et au traitement des détecteurs de traces gravées. Qui plus est, cela reviendra sans doute moins cher, pour tous les programmes de mesure du ²²²Rn hormis ceux de très grande ampleur, que de s'équiper d'un laboratoire capable de traiter les données des détecteurs de traces gravées. Lors de l'acquisition de tels détecteurs ou de systèmes clés en main, il conviendra de s'assurer que les appareils ont obtenu de bonnes notes dans les essais comparatifs internationaux de détecteurs passifs de ²²²Rn et sont conformes aux normes fixées par l'autorité nationale pour les mesures de ²²²Rn [II–22].

DÉTECTEURS À CHARBON ACTIF

II–11.Le détecteur à charbon actif, parfois désigné sous l'appellation plus formelle de « dispositif d'adsorption à charbon actif », consiste en un petit récipient contenant du charbon actif qui adsorbe le ²²²Rn présent dans l'air ; il est doté d'un écran et, le plus souvent, d'une barrière de diffusion. Après utilisation, il est scellé et renvoyé au laboratoire où il sera analysé au moyen d'un détecteur à scintillation qui mesure les émissions de rayons gamma provenant des descendants à courte période du ²²²Rn [II–6].

II-12. La période radioactive du radon 222 est de 3,82 jours. Le ²²²Rn adsorbé par le charbon au début de son utilisation décroît jusqu'à des niveaux qui ne

permettent plus guère, au bout d'une semaine environ, de déterminer avec toute la précision voulue la concentration d'activité du radon couramment présente dans l'air intérieur d'un logement. En outre, le ²²²Rn capturé sur le charbon actif risque d'être à nouveau perdu. Les travaux de Luetzelschwab et al. [II–32] consacrés à la réaction des dosimètres à charbon actif ont permis de constater que les niveaux de température et d'humidité influaient fortement sur les détecteurs dépourvus de barrière de diffusion et que ceux-ci ne devaient pas être utilisés plus de deux jours. Les détecteurs réagissaient mieux en revanche en cas d'utilisation d'une barrière de diffusion. Les mesures doivent être réalisées sur une durée inférieure à une semaine. Le principe de détection du ²²²Rn par adsorption sur le charbon actif a été initialement décrit par Hursh [II–33].

II-13. Les détecteurs à charbon actif ne se prêtent pas à la réalisation de mesures sur le long terme, mais peuvent être utilisés à des fins de dépistage : ils permettent ainsi de se faire une idée de l'efficacité des dispositions préventives et des actions correctives mises en œuvre, ou de s'apercevoir de l'existence d'un important problème de ²²²Rn dans un bâtiment. Pour mieux cerner l'exposition à long terme due au ²²²Rn, des mesures de confirmation doivent être effectuées sur une longue durée.

CHAMBRES D'IONISATION À ÉLECTRET

II–14. Une chambre d'ionisation à électret contient un disque électrostatique revêtu de polytétrafluoroéthylène (PTFE) qui a été chargé positivement, généralement à un potentiel d'environ 700 V [II–34]. L'électret retient cette charge électrostatique qui est progressivement neutralisée par l'ionisation de l'air contenu dans la chambre, sous l'effet des particules alpha émises par le ²²²Rn et ses descendants. En mesurant la charge sur l'électret au début et à la fin d'une période donnée, il est possible de calculer la concentration de ²²²Rn. Ce calcul doit tenir compte de l'ionisation imputable au rayonnement de fond naturel, étant donné que le débit de dose gamma ambiant relevé à l'endroit où le détecteur réalise la mesure contribue à une chute de tension déterminée de l'électret. La baisse de tension n'étant de surcroît pas linéaire, un calibrage minutieux s'impose. Il existe plusieurs types d'électrets et différentes tailles de chambres, adaptés à la durée des mesures à effectuer selon qu'elle s'étale sur quelques jours ou quelques mois [II–6].

II-15. Les chambres d'ionisation à électret doivent être manipulées avec précaution : toute chute ou tout contact avec la surface sensible de l'électret peut en effet provoquer une décharge partielle ou totale du disque et, partant, entraîner

une surestimation de la concentration de ²²²Rn. Elles sont par ailleurs sensibles aux conditions environnementales telles que la pression atmosphérique ou un niveau élevé d'humidité de l'air susceptible d'entraîner une condensation de l'eau sur les surfaces internes. En principe, leur taille n'est pas de nature à empêcher leur expédition par voie postale, mais leur sensibilité, notamment aux chocs mécaniques, rendrait cette solution peu pratique. Les électrets sont généralement utilisés pour des mesures de dépistage et de diagnostic. Il est rarement fait appel aux détecteurs pour des études à grande échelle.

MONITEURS DE MESURE EN CONTINU DU RADON

II-16. Différents types de moniteurs électroniques permettant de mesurer en continu le radon sont proposés ; certains reposent sur le principe de la détection spectrométrique, d'autres sur celui de la détection non spectrométrique. Ces moniteurs prélèvent des échantillons d'air en continu et mesurent le radon ou ses descendants par échantillonnage actif ou transport diffusif de l'air chargé de radon dans le volume sensible des détecteurs. Les méthodes de test faisant appel à ces types d'appareils sont décrites dans une norme internationale [II-7]. Dans les moniteurs de gaz radon, un filtre permet d'éliminer des échantillons d'air les descendants du radon et les poussières. Le filtre pourrait également servir à procéder à un mesurage quasi continu des descendants du radon. En effectuant des mesures répétées sur plusieurs périodes successives, il est possible de déterminer la variation de la concentration de radon dans le temps.

II-17. S'il s'avère nécessaire de réaliser des mesures très précises, notamment en cas de très faibles concentrations de radon, il faudra sans doute opter pour une solution faisant appel à une chambre d'ionisation à impulsions [II-35]. Cet équipement coûteux et complexe ne se prête généralement pas à des programmes de mesure de grande ampleur, mais peut être d'une aide extrêmement précieuse lorsqu'un examen minutieux des facteurs affectant les concentrations de radon dans un bâtiment donné est requis. Les systèmes de mesure par échantillonnage actif nécessitent un investissement important en termes de mobilisation de personnel et d'analyse des données, de sorte qu'il n'y est généralement recouru qu'à des fins de diagnostic ou de recherche.

MESURE RÉTROSPECTIVE DU ²²²RN

II-18. La technique de mesure rétrospective du ²²²Rn est une méthode passive qui consiste à estimer, au moyen de détecteurs de traces alpha, l'activité

surfacique du ²¹⁰Po - un descendant du ²²²Rn - qui se dépose sur des objets en verre appropriés disposés dans une pièce [II-36]. Deux types de détecteurs de traces alpha sont couramment utilisés. Les premiers, communément appelés « CR-39 », sont composés de polycarbonate de diglycol allylique : les seconds, commercialisés sous le nom de « LR-115 », sont composés de nitrate de cellulose. Les détecteurs LR-115 sont sensibles aux particules alpha dont l'énergie est comprise entre 1,2 et 4,8 MeV et n'enregistrent pas les particules alpha de 5,3 MeV émises par le ²¹⁰Po implanté dans le verre ; en revanche, ils produisent des traces proportionnelles à l'activité alpha intrinsèque du verre lui-même. Les détecteurs CR-39 enregistrent les traces produites à la fois par l'activité surfacique du ²¹⁰Po implanté dans le verre et par l'activité intrinsèque du verre lui-même. La différence de densité des traces relevées par les deux types de détecteurs permet d'estimer la quantité de ²¹⁰Po implantée dans le verre après son dépôt sur la surface du verre et la désintégration du premier descendant, le ²¹⁸Po, (essentiellement sous forme nanométrique). Cette technique permet d'évaluer la décroissance du ²²²Rn dans la pièce tout au long de la durée de vie du verre.

- II–19. À partir de la mesure de l'activité surfacique du ²¹⁰Po implanté dans le verre, de l'âge du verre et des informations relatives aux paramètres de la pièce (concentrations moyennes d'aérosols et taux de ventilation, par exemple), il est possible d'estimer, à l'aide des modèles existants, la concentration moyenne de ²²²Rn à laquelle le verre a été exposé.
- II–20. Les objets en verre « appropriés » sont ceux qui auraient suivi les occupants lors d'un déménagement et qui peuvent ainsi fournir un historique de l'exposition due au ²²²Rn le plus souvent, des cadres en verre contenant des photos de famille qui peuvent être datées avec précision.
- II–21. Une autre méthode d'appréciation rétrospective des expositions dues au ²²²Rn consiste à évaluer les dommages dus aux particules alpha qui rencontrent la surface de disques compacts [II–37, II–38].

TECHNIQUES DE MESURE ADAPTÉES AU ²²⁰RN

II–22. En raison de la courte période radioactive du ²²⁰Rn (55,6 secondes), l'équilibre entre celui-ci et ses nucléides de filiation peut être extrêmement variable. Sous l'angle de la protection radiologique, le fait de mesurer les concentrations de descendants du ²²⁰Rn plutôt que les concentrations du gaz radon 220 a plus de sens et peut s'avérer plus pratique, plus facile et plus approprié. S'agissant du ²²⁰Rn, le déséquilibre entre les mesures relevées pour

le gaz et pour ses descendants peut être très marqué dans les logements et dans d'autres environnements intérieurs et extérieurs. Les concentrations de ²²⁰Rn dans les bâtiments ordinaires ne seront vraisemblablement significatives qu'en cas de concentrations élevées de son radionucléide précurseur dans les matériaux de construction qui entrent en contact avec l'air dans un espace intérieur. En règle générale, la brièveté de la période radioactive du ²²⁰Rn rend impossible son transport ou sa diffusion du sol vers des espaces intérieurs à travers un ouvrage de maçonnerie. En outre, on observe souvent une différence considérable entre la distribution spatiale du gaz et celle de ses descendants dans l'air intérieur, en raison principalement de la courte période radioactive du ²²⁰Rn par rapport à celle de certains de ses descendants. Cette différence de distribution spatiale fait que l'équilibre du ²²⁰Rn est plus difficile à évaluer que pour le ²²²Rn.

- II–23. Il existe plusieurs techniques permettant de mesurer le ²²⁰Rn et ses descendants. Ces techniques reposent principalement sur la détection des particules alpha émises dans la chaîne de désintégration radioactive, et dans une moindre mesure, sur l'exploitation de l'énergie que dégagent les rayons gamma. Parmi les détecteurs alpha auxquels il est fait appel figurent notamment les détecteurs à scintillation ZnS(Ag), les appareils de type détecteurs à barrière de surface, les chambres d'ionisation, les électrets et les détecteurs solides de traces nucléaires.
- II–24. S'agissant du gaz ²²⁰Rn , une technique utilisant un détecteur passif de traces alpha a été mise au point pour mesurer à la fois le ²²²Rn et le ²²⁰Rn [II–39, II–40]. Elle a recours à un détecteur de traces alpha à double discrimination qui exploite les propriétés de diffusion du ²²²Rn et du ²²⁰Rn. L'un des détecteurs est placé dans une chambre où le taux de renouvellement de l'air est élevé, créant ainsi une barrière de faible diffusion pour le ²²⁰Rn et le ²²²Rn. L'autre détecteur, conçu pour un faible taux de renouvellement de l'air, agit comme une barrière de haute diffusion pour le ²²⁰Rn, mais pas pour le ²²²Rn. À partir des traces alpha enregistrées sur les deux détecteurs, il est possible, en s'appuyant sur les facteurs d'étalonnage déterminés à l'aide de chambres d'étalonnage standard, de mesurer les concentrations de ²²⁰Rn et de ²²²Rn.
- II–25. La technique fondée sur la chambre d'ionisation à électret, qui sert généralement à mesurer le ²²²Rn, a été modifiée pour mesurer le ²²⁰Rn [II–34].
- II–26. Des techniques actives comme celles qui utilisent des cellules à scintillation de type Lucas et des chambres d'ionisation permettent également de mesurer le ²²⁰Rn. Étant donné les disparités des périodes radioactives observées dans les chaînes de désintégration du ²²²Rn et du ²²⁰Rn, des techniques ont été

développées pour faire en sorte que les écarts de temps entre les impulsions provenant de ces séries dans les détecteurs puissent être mis à profit pour distinguer les radioisotopes et mesurer leur activité séparément [II-41, II-42]. Ces techniques reposent sur une analyse des signaux alpha du détecteur par rapport aux temps d'échantillonnage et de comptage écoulés. Les radionucléides ²²⁰Rn et leurs descendants immédiats, le ²¹⁶Po, sont pour la plupart en équilibre séculaire en raison de la très courte période radioactive du ²¹⁶Po (0,15 s). Les signaux alpha émanant de ces nucléides peuvent ainsi être enregistrés électroniquement par un détecteur sous forme de coïncidences retardées ; il est alors possible, grâce à des algorithmes informatiques, d'analyser les impulsions et d'estimer les concentrations de gaz ²²⁰Rn. Ce procédé est également utile lorsque d'autres émetteurs alpha sont présents parmi les descendants du ²²²Rn ou du ²²⁰Rn. Certains types d'instruments misent, pour déterminer la concentration de gaz ²²⁰Rn, sur un procédé consistant en une collecte électrostatique des nucléides de filiation du ²²⁰Rn sur un détecteur à barrière de surface, suivie d'une spectrométrie alpha [II-43], ladite concentration étant estimée à partir de l'énergie alpha du ²¹⁶Po (6,78 MeV).

La concentration de descendants du ²²⁰Rn dans l'air peut être aisément déterminée par un prélèvement d'échantillons d'air au moyen d'une pompe aspirante et par une analyse de l'activité alpha à l'aide de séquences temporelles de comptage différé [II-43, II-44]. L'analyse alpha peut être réalisée soit par comptage brut, soit par spectrométrie alpha. La concentration de gaz ²²⁰Rn peut également être déterminée en recourant à une technique de double filtre [II-45]. Celle-ci consiste à laisser passer l'air à travers un tube métallique d'une longueur donnée qui permet d'obtenir sur ses parois un dépôt minimal de nucléides de filiation du ²²⁰Rn. Deux papiers filtres sont placés à l'entrée et à la sortie du tube. Le premier filtre empêche les descendants d'entrer dans le tube. Le gaz se désintègre lors de son passage dans le tube et les descendants sont recueillis sur le deuxième filtre. Une analyse de l'activité alpha est réalisée sur le second filtre alors qu'il est en équilibre transitoire, et la concentration de gaz ²²⁰Rn est ainsi déterminée. Si des échantillons doivent être prélevés à l'intérieur des logements, cette technique peut nécessiter des tubes de grand volume, dont le transport d'un endroit à l'autre risque de s'avérer peu pratique.

II-28. Les méthodes actives ne permettent pas d'obtenir des données sur le long terme car les durées d'échantillonnage sont généralement courtes. Leur utilisation pour des enquêtes nationales de grande envergure à des fins d'études épidémiologiques est donc limitée. Il est parfois préférable, dans ce cas, de se tourner vers les techniques de détection passive étalées sur une certaine durée. Il a été établi récemment que les moniteurs passifs qui enregistrent les émissions

alpha du ²¹²Po (8,78 MeV, ce qui en fait l'énergie alpha la plus élevée parmi les nucléides de filiation du ²²²Rn et du ²²⁰Rn) sur des détecteurs solides de traces nucléaires offrent la possibilité de procéder à des mesures directes pour déterminer l'exposition due aux descendants du ²²⁰Rn [II–46, II–47]. Cette méthode permet, grâce à l'utilisation d'un film plastique aluminisé et d'un film protecteur en polypropylène d'une épaisseur totale de 71 µm, de ne laisser que les particules alpha de 8,78 MeV pénétrer les films et enregistrer des traces. À cela est venue s'ajouter dernièrement une technique d'estimation de la concentration équivalente à l'équilibre du ²²⁰Rn, dont le principe repose sur la mise en correspondance des traces gravées sur des films par les descendants du ²²⁰Rn avec des mesures actives intégrant les données temporelles (au moyen des moniteurs de dépôt).

II–29. Le procédé proposé par l'Association américaine d'essai des matériaux constitue une méthode relativement simple pour déterminer la concentration des produits de désintégration du radon sans qu'il faille recourir à un matériel sophistiqué spécialement conçu à cet effet [II–48].

MESURES DE DIAGNOSTIC DU RADON

II-30. Le diagnostic du radon couvre un ensemble complexe de méthodes de mesure en rapport avec le radon pour certaines, et sans rapport avec lui pour d'autres, qui sont appliquées pour identifier l'origine et analyser qualitativement et quantitativement ses voies de transport [II-49, II-50]. Plusieurs techniques et principes de mesure décrits à l'annexe II peuvent servir de base pour réaliser un diagnostic du radon axé sur l'évaluation de sa présence dans un environnement intérieur et dans les gaz du sol.

RÉFÉRENCES RELATIVES À L'ANNEXE II

- [II–1] VANMARCKE, H., BERKEVENS, P., POFFIJN, A., Radon versus radon daughters, Health Phys. **56** (1989) 229–231.
- [II-2] UNITED NATIONS, Effects of Ionizing Radiation (2006 Report to the General Assembly), Annex E: Sources-to-Effects Assessment for Radon in Homes and Workplaces, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (2009).

- [II-3] ORGANISATION INTERNATIONALE DE STANDARDISATION, Mesurage de la radioactivité dans l'environnement— Air : Radon-222 — Partie 1 : Origine du radon et de ses descendants à vie courte, et méthodes de mesure associées, norme ISO 11665-1:2012, ISO, Genève (2012).
- [II–4] MILES, J.C.H., Temporal variation of radon levels in houses and implications for radon measurement strategies, Radiat. Prot. Dosim. **93** (2001) 369–375.
- [II-5] ORGANISATION INTERNATIONALE DE STANDARSIZATION, Mesurage de la radioactivité dans l'environnement— Air : Radon-222 — Partie 6 : Méthodes de mesure ponctuelle de l'activité volumique, norme ISO 11665-6:2012, ISO, Genève (2012).
- [II-6] ORGANISATION INTERNATIONALE DE STANDARDISATION, Mesurage de la radioactivité dans l'environnement— Air : Radon-222 — Partie 4 : Méthode de mesure intégrée pour la détermination de l'activité volumique moyenne du radon avec un prélèvement passif et une analyse en différé, norme ISO 11665-4:2012, ISO, Genève (2012).
- [II-7] ORGANISATION INTERNATIONALE DE STANDARDISATION, Mesurage de la radioactivité dans l'environnement— Air : radon 222 — Partie 5 : Méthode de mesure en continue de l'activité volumique, norme ISO 11665-5:2012, ISO, Genève (2012).
- [II-8] STECK, D.J., Annual average indoor radon variations over two decades, Health Phys. 96 (2009) 37–47.
- [II-9] ARVELA, M., VOUTILAINEN, I., CASTREN, O., WINQVIST, K., Comparison of predicted and measured variations of radon indoor concentrations, Radiat. Prot. Dosim. 24 (1988) 231–235.
- [II-10] WRIXON, A.D., GREEN, B.M.R., LOMAS, P.R., et al., Natural Radiation Exposure in UK Dwellings, NRPB-R190, National Radiological Protection Board, Chilton (1988).
- [II–11] MAJBORN, B., Seasonal variations of radon concentrations in single-family houses with different sub-structures, Radiat. Prot. Dosim. 45 (1992) 443–447.
- [II-12] PINEL, J., FEARN, T., DARBY, S.C., MILES, J.C.H., Seasonal correction factors for indoor radon measurements in the United Kingdom, Radiat. Prot. Dosim. 58 (1995) 127-132.
- [II-13] ORGANISATION INTERNATIONALE DE STANDARDISATION, Mesurage de la radioactivité dans l'environnement— Air : radon222 — Partie 2 : Méthode de mesure intégrée pour la détermination de l'énergie alpha potentielle volumique moyenne de ses descendants à vie courte, norme ISO 11665-2:2012, ISO, Genève (2012).
- [II-14] ORGANISATION INTERNATIONALE DE STANDARDISATION, Mesurage de la radioactivité dans l'environnement— Air : radon 222 — Partie 3 : Méthode de mesure ponctuelle de l'énergie alpha potentielle volumique de ses descendants à vie courte, norme ISO 11665-3:2012, ISO, Genève (2012).
- [II-15] ORGANISATION INTERNATIONALE DE STANDARDISATION, Mesurage de la radioactivité dans l'environnement— Air : radon 222 — Partie 7 : Méthodes d'estimation du flux surfacique d'exhalation par la méthode d'accumulation, norme ISO 11665-7:2012, ISO, Genève (2012).

- [II-16] ORGANISATION INTERNATIONALE DE STANDARDISATION, Mesurage de la radioactivité dans l'environnement— Air : radon 222 — Partie 8 : Méthodologies appliquées aux investigations initiales et complémentaires dans les bâtiments, norme ISO 11665-8:2012, ISO, Genève (2012).
- [II–17] COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE, Instrumentation pour la radioprotection Instruments de mesure du radon et des descendants du radon Partie 1 : Règles générales, norme CEI 61577-1, CEI, Genève (2006).
- [II-18] COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE, Instrumentation pour la radioprotection - Instruments de mesure du radon et des descendants du radon - Partie 2 : Exigences spécifiques concernant les instruments de mesure du radon, norme CEI 61577-2, CEI, Genève (2014).
- [II–19] COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE, Instrumentation pour la radioprotection Instruments de mesure du radon et des descendants du radon Partie 3 : Exigences spécifiques concernant les instruments de mesure des descendants du radon, norme CEI 61577-3, CEI, Genève (2011).
- [II–20] CALMET, D., et al., International standardisation work on the measurement of radon in air and water, Radiat. Prot. Dosim. 145 (2011) 267–272.
- [II-21] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Protocols for Radon and Radon Decay Product Measurements in Homes (1993), http://www.epa.gov/radon/pdfs/homes protocols.pdf
- [II-22] HOWARTH, C.B., MILES, J.C.H., Validation Scheme for Organizations Making Measurements of Radon in Dwellings: révision 2008, HPA-RPD-047, HPA, Chilton (2008).
- [II-23] AUTORITÉ DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE, Recueil des dispositions législatives et réglementaires relatives à la radioprotection, Partie 1 : Extraits du code de la santé publique et du code du travail concernant la protection de la population, des patients et des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants, ASN, Montrouge, France (2013).
- [II-24] AUTORITÉ DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE, Recueil des dispositions législatives et réglementaires relatives à la radioprotection, Partie 2 : Arrêtés et décisions pris en application du code de la santé publique et du code du travail concernant la protection de la population, des patients et des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants, ASN, Montrouge, France (2012).
- [II-25] IBRAHIMI, Z.-F., MILES, J.C.H., An etched track detector for short-term screening measurements of radon, J. Radiol. Prot. 29 (2009) 139–146.
- [II-26] YU, K.N., YOUNG, E.C.M., LI, K.C., A study of factors affecting indoor radon properties, Health Phys. 71 (1996) 179–184.
- [II–27] GEORGE, A.C., State of the art instruments for measuring radon/thoron and their progeny in dwellings — A review, Health Phys. 70 (1996) 451–463.
- [II–28] GEIGER, E.L., Radon film badge, Health Phys. 13 (1967) 407–411.
- [II-29] DURRANI, S.A., ILIĆ, R., Radon Measurements by Etched Track Detectors: Applications in Radiation Protection, Earth Sciences and the Environment, World Scientific Publishing, Singapore (1997).

- [II-30] TOKONAMI, S., Why is ²²⁰Rn (thoron) measurement important? Radiat. Prot. Dosim. **141** (2010) 335–339.
- [II-31] MILES, J.C.H., KENDALL, G.M., IBRAHIMI, F., HOWARTH, C.B., Practical considerations for radon etched track dosimetry service, J. Radiol. Prot. 24 (2004) 165-171.
- [II-32] LUETZELSCHWAB, J.W., HASTINGS, L., ELLIS, S.M., Adsorption of Rn -222 by open-faced and diffusion barrier canisters at different conditions of temperature and humidity, Health Phys. 66 (1994) 63–71.
- [II–33] HURSH, J.B., The measurement of breath radon by charcoal absorption, Nucleonics 12 1 (1954) 63–65.
- [II-34] KOTRAPPA, P., E-PERM System Manual Part II 11 Modified E-PERM for Passive Measurements of Thoron in Air, Rad. Elec. Inc, Frederick, MD (1996).
- [II-35] ISHIKAWA, T., Effects of thoron on a radon detector of pulse-ionization chamber type, Radiat. Prot. Dosim. 108 (2004) 327–330.
- [II-36] McLAUGHLIN, J.P., The application of techniques to assess radon exposure retrospectively, Radiat. Prot. Dosim. **78** (1998) 1-6.
- [II–37] PRESSYANOV, D.S., BUYSSE, J., POFFIJN, A., MEESEN, G., VAN DEYNSE, A., The compact disk as radon detector a laboratory study of the method, Health Phys. **84** 5 (2003) 642–651.
- [II–38] PRESSYANOV, D.S., Modeling a ²²²Rn measurement technique based on absorption in polycarbonates and track-etch counting, Health Phys. **97** (2009) 604–612.
- [II-39] DOI, M., KOBAYASHI, S., FUJIMOTO, K., A passive measurement technique for characterisation of high-risk houses in Japan due to enhanced levels of indoor radon and thoron concentrations, Radiat. Prot. Dosim. 45 (1992) 425–430.
- [II-40] TOKONOMI, S., TAKAHASHI, H., KOBAYASHI, Y., ZHOU, W., HULBER, E., Up-to-date radonthoron discriminative detector for large scale surveys, Rev. Sci. Instrum. 76 (2005) 113505–113509.
- [II–41] FALK, R., MORE, H., NYBLOM, L., Measurements of ²²⁰Rn in air using a flow-through Lucas cell and multiple time analysis of recorded pulse events, Radiat. Prot. Dosim. **45** (1992) 111–113.
- [II-42] IIMOTO, T., KUROSAWA, R., A pulse coincidence ²²⁰Rn monitor with three time-gates, Environ. Int. 22 Suppl. 1 (1996) S1139-S1145.
- [II–43] McLAUGHLIN, J., An overview of thoron and its progeny in the indoor environment, Radiat. Prot. Dosim. 141 (2010) 316–321.
- [II-44] HARIDASAN, P.P., PILLAI, P.M.B., TRIPATHI, R.M., PURANIK, V.D., Occupational radiation exposure due to NORM in a rare-earth compounds production facility, Radiat. Prot. Dosim. 131 (2008) 217–221.
- [II–45] KOTRAPPA, P., et al., "Modified double-filter system for measuring radon/thoron in the environment and in exhaled breath", Advances in Radiation Protection Monitoring (Proc. Symp. Stockholm, 1978), IAEA, Vienna (1979) 423.
- [II–46] ZHOU, W., IIDA, T., Estimation of thoron progeny concentrations in dwellings with their deposition rate measurements, Jpn. J. Health Phys. 35 (2000) 365–370.

- [II-47] MISHRA, R., MAYYA, Y.S., Study of deposition-based direct thoron progeny sensor (DTPS) technique for estimating equilibrium equivalent thoron concentration (EETC) in indoor environment, Radiat. Meas. 43 (2008) 1408-1416.
- [II-48] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standard Test Method for Determination of Radon Decay Product Concentration and Working Level in Indoor Atmospheres by Active Sampling on a Filter, ASTM D6327 - 10, West Conshohocken, PA (2010).
- [II-49] FROŇKA, A., MOUČKA, L., ČECHÁK, T., Application of the advanced radon diagnosis methods in the indoor building environment, Radiat. Prot. Dosim. 130 (2008) 172-175.
- [II-50] FRONKA, A., Indoor and soil gas radon simultaneous measurements for the purpose of detailed analysis of radon entry pathways into houses, Radiat. Pot. Dosim. 145 (2011) 117-122.

Annexe III

MESURES PRÉVENTIVES VISANT À RÉDUIRE LES CONCENTRATIONS DE ²²²RN DANS LES LOGEMENTS NEUFS ET AUTRES BÂTIMENTS NOUVELLEMENT CONSTRUITS

III-1. De plus en plus d'États mettent en place des mesures ayant pour but d'empêcher l'accumulation de ²²²Rn dans les nouvelles constructions. Il est généralement moins coûteux et plus facile d'intégrer des mesures préventives portant sur le radon au moment de l'édification d'un nouveau bâtiment que de devoir prendre des actions correctives pour un logement existant. Ces mesures préventives applicables aux nouvelles constructions réduiront progressivement les concentrations moyennes de ²²²Rn dans le parc immobilier et contribueront ainsi à atténuer les effets que génère, en termes de santé publique, l'exposition à long terme de la population due au ²²²Rn dans un environnement intérieur. Elles peuvent en outre améliorer d'autres aspects de la qualité de l'air intérieur. Les mesures préventives portant sur le radon ayant été établies pour des régions du monde où se succèdent quatre saisons climatiques distinctes, il sera peut-être nécessaire de s'assurer de leur applicabilité dans d'autres parties du globe.

III–2. La pose d'une membrane imperméable d'un seul tenant destinée à assurer une isolation entre le sol et le bâtiment sur toute la superficie de l'habitation constitue une mesure efficace de prévention du radon dans les nouvelles constructions. L'efficacité de la membrane anti-radon dépend en grande partie du soin apporté à son installation. Il est recommandé de la faire vérifier, autant que faire se peut, dans le cadre des contrôles habituellement réalisés lors de l'édification de nouveaux bâtiments. Son intégrité et sa durabilité importent généralement davantage que ses propriétés de barrière contre la diffusion du radon. Le choix d'une barrière anti-radon efficace parmi les matériaux étanches proposés sur le marché pourra être dicté par le coefficient de diffusion du radon [III–1]; les valeurs données pour ce dernier dans les matériaux imperméables courants sont renseignées dans le doc. de réf. [III–2]. La mesure dudit coefficient peut également servir à tester l'étanchéité à l'air des joints entre des membranes préfabriquées.

III-3. Outre la pose d'une membrane, une ventilation ou une dépressurisation du sol (sous la dalle), ou une ventilation et/ou une dépressurisation du vide sanitaire sous le plancher peut également être envisagée. L'objectif des systèmes utilisés à cet effet est de diluer les concentrations de radon sous la membrane et de faire en sorte que la pression de l'air dans le sol ou dans le vide sanitaire soit inférieure

à la pression de l'air à l'intérieur du logement. Les deux systèmes peuvent fonctionner de manière passive ou active. La nécessité de prévoir un ventilateur d'extraction dépendra de la perméabilité du sol, de la géométrie des fondations, de la hauteur du vide sanitaire et du dispositif de ventilation (avec ou sans extraction verticale). Les systèmes passifs peuvent être activés en installant un ventilateur extracteur [III–3]. Ces travaux pourront être réalisés ultérieurement, s'il ressort des concentrations de radon mesurées après l'emménagement du bâtiment que la ventilation passive n'est pas efficace. Les publications d'un certain nombre d'autorités nationales donnent des conseils pratiques très complets concernant les mesures de prévention du ²²²Rn [III–4 à III–11].

III–4. La mise en œuvre des mesures préventives portant sur le ²²²Rn dans les nouveaux bâtiments passe le plus souvent par les codes de la construction nationaux. On trouvera des exemples de ces codes dans le tableau III–1, tiré du doc. de réf. [III–12]. Les mesures préventives susmentionnées se distinguent aussi par le fait qu'elles permettent dans bien des cas de réduire les concentrations d'autres polluants qui, sans cela, pénètreraient dans les habitations avec les gaz du sol - un avantage non négligeable, mais qu'il peut être difficile de quantifier de manière formelle.

III-5. Dans certains États, les concentrations de ²²²Rn dans les gaz du sol et la perméabilité du sol sur lequel il est envisagé d'ériger des bâtiments sont calculées avant le début des travaux de construction, de manière à avoir une idée de l'ampleur des mesures préventives à prévoir dans les futurs logements [III-13]. Cela peut, dans certaines conditions, contribuer à améliorer la conception des mesures de prévention du ²²²Rn et à les rendre plus efficaces. Les pratiques de construction définies pour l'édification de bâtiments à haut rendement énergétique peuvent avoir une influence - positive ou négative - sur les concentrations de ²²²Rn dans un environnement intérieur. L'obligation de veiller à ce que les nouvelles constructions soient conformes aux normes nationales en matière d'étanchéité à l'air tend à entraîner un taux de renouvellement de l'air inférieur à celui des bâtiments existants. En améliorant l'efficience thermique d'un bâtiment, la température plus élevée de l'air intérieur peut faire baisser la pression à l'intérieur du bâtiment et entraîner ainsi un flux plus important de ²²²Rn entre le sol et le bâtiment. Certains pays ont modifié les codes de la construction sur ce point pour éviter les fortes concentrations de ²²²Rn à l'intérieur des bâtiments à haut rendement énergétique.

TABLEAU III–1. LÉGISLATION EN VIGUEUR DANS DIFFÉRENTS ÉTATS EN MATIÈRE DE PRÉVENTION DU ²²²RN DANS LES NOUVELLES CONSTRUCTIONS

(tableau établi à partir des travaux de Lund [III-12] et mis à jour)

État	Organisme de réglementation ou autorité nationale	Code, loi ou règlement	Date
Allemagne	Ministère de l'intérieur du Land de Saxe	Code du bâtiment du Land de Saxe	1997
	Ministère fédéral de l'environnement, de la protection de la nature et de la sécurité nucléaire, Ministères de l'environnement des Länder allemands	Ordonnance sur la radioprotection	2001
Canada	Commission canadienne des codes du bâtiment et de prévention des incendies	Code national du bâtiment du Canada de 1995 (révisé en 1998)	1998
Danemark	Ministère du logement	Normes de construction applicables aux petits logements	1998
Finlande	Building Information Ltd, en coopération avec le Ministère de l'environnement	Building Information RT - Prévention du radon dans les nouvelles constructions RF-81-10791	2003
	Ministère de l'environnement	Code du bâtiment B3 - Fondations, et D2 - Climatisation et aération intérieure des bâtiments	2003
Irlande	Département de l'environnement	Code national de la construction et documents d'orientation technique y afférents	1997
	Organisme de normalisation (NSAI)/Irish Agreement Board (organisme de certification)	Certification d'évaluation technique et d'agrément des membranes anti-radon, loi n° 497	1997

TABLEAU III–1. LÉGISLATION EN VIGUEUR DANS DIFFÉRENTS ÉTATS EN MATIÈRE DE PRÉVENTION DU ²²²RN DANS LES NOUVELLES CONSTRUCTIONS (suite)

(tableau établi à partir des travaux de Lund [III–12] et mis à jour)

État	Organisme de réglementation ou autorité nationale	Code, loi ou règlement	Date
Pologne	Agence polonaise de l'énergie atomique	Législation caduque	Jusqu'en 2002
République tchèque	Bureau national pour la sûreté nucléaire	Loi atomique n° 18/1997 telle que modifiée Règlement n° 307/2002 tel que modifié	1997 2002
	Office tchèque de normalisation, de métrologie et d'essais	Normes tchèques relatives à la protection des bâtiments CSN 730601	2006
Royaume-Uni	Bureau du Vice-premier ministre, Division du code de la construction	Code de la construction applicable en Angleterre et au pays de Galles	1999
	Département de l'environnement pour l'Irlande du Nord	Code de la construction applicable en Irlande du Nord	2001
	Exécutif écossais	Code de la construction pour l'Écosse	1999
Slovénie	Ministère de l'environnement et de l'aménagement du territoire	Règles relatives à l'aération et à la climatisation des bâtiments (Journal officiel n° 42/2002)	2002
Suède	Conseil national du logement, de la construction et de la planification	Code suédois de la construction BFS 2014:3 BBR 21	2014
		Loi sur la planification et la construction	1987
Suisse	Office fédéral de la santé publique	Loi sur la radioprotection (RS 814.50)	1991

TABLEAU III–1. LÉGISLATION EN VIGUEUR DANS DIFFÉRENTS ÉTATS EN MATIÈRE DE PRÉVENTION DU ²²²RN DANS LES NOUVELLES CONSTRUCTIONS (suite)

(tableau établi à partir des travaux de Lund [III-12] et mis à jour)

État	Organisme de réglementation o autorité nationale	ou Code, loi ou règlement	Date
		Ordonnance sur la radioprotection (RS 814.501)	1994
	Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA)	Norme SIA 180 relative à l'isolation thermique et à la protection contre l'humidité dans les bâtiments	1999

RÉFÉRENCES RELATIVES À L'ANNEXE III

- [III-1] JIRÁNEK, M., ROVENSKA, K., Basic principles for the development of a common standardised method for determining the radon diffusion coefficient in waterproofing materials, Appl. Radiat. Isot. **70** (2012) 752–757.
- [III-2] JIRÁNEK, M., KOTRBATÁ, M., Radon diffusion coefficients in 360 waterproof materials of different chemical composition, Radiat. Prot. Dosim. 145 1 (2012) 178–183.
- [III-3] ARVELA, H., HOLMGREN, O., REISBACKA, H., Radon prevention in new construction in Finland: a nationwide sample survey in 2009, Radiat. Prot. sim. 148 4 (2012) 465–474.
- [III-4] UNITED KINGDOM BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT, Radon: Guidance on Protective Measures for New Buildings, Report No. BR 211, BRE, Garston (2007).
- [III–5] BUNDESUMWELTMINISTERIUM (BMU), BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ (BfS), Das radonHandbuch Deutschland, BMU, Bonn (2001).
- [III-6] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Build Radon Out: a Step by Step Guide on How to Build Radon Resistant Homes (2001), http://www.epa.gov/radon/pdfs/buildradonout.pdf
- [III-7] DEPARTMENT OF THE ENVIRONMENT AND LOCAL GOVERNMENT, Radon in Existing Buildings: Options correctives, Dublin (2002), http://www.environ.ie/en/DevelopmentHousing/BuildingStandards/ PublicationsDocuments/FileDownLoad,1656,en.pdf

- [III-8] UNITED KINGDOM BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT, How to reduce radon levels in your home, UK BRE, Garston, Watford (2000), http://www.bre.co.uk/radon/reduce.html
- [III-9] CZECH OFFICE FOR STANDARDS, Protection of Houses against Radon from the Soil, CSN 730601, Czech Office for Standards, Metrology and Testing, Prague (2006).
- [III-10] OFFICE FÉDÉRAL SUISSE DE LA SANTÉ PUBLIQUE, Recommandations de l'OFSP pour les bâtiments neufs (2012), http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00046/11592/index.?lang=en& download=NHzLpZeg7t,lnp6I0NTU04212Z6ln1ad1IZn4Z2qZpnO2Yuq2Z 6gpJCEfX5 f2ym162epYbg 2c JjKbNoKSn6A--
- [III–11] ÖSTERREICHISCHE AGENTUR FÜR GESUNDHEIT UND ERNÄHRUNGSSICHERHEIT, MINISTERIUM FÜR UMWELT NATURSCHUTZ UND VERKEHR BADEN-WÜRTTEMBERG, BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDESAGENTUR FÜR UMWELT BOZEN, SWISS FEDERAL OFFICE OF PUBLIC HEALTH, AMT DER OBERÖSTERREICHISCHE LANDESREGIERUNG, Radon: Precautions for New Buildings (2011), http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00046/11592/index.html?lang=en&download=NHzLpZeg7t,lnp6I0NTU04212Z6In1ad11Zn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gp JCJfH18g2ym162epYbg2c JjKbNoKSn6A--
- [III–12] LUND, C.E., Protecting new buildings, Deliverable D7 of the ERRICCA Project, European Commission, Luxembourg (2004).
- [III-13] NEZNAL, M., NEZNAL, M., MAOTLIN, M., BARNET, I., MIKSOVA, J., The New Method for Assessing the Radon Risk of Building Sites, Czech Geological Survey Special Papers 16, Czech Geological Survey, Prague (2004).

Annexe IV

ACTIONS CORRECTIVES VISANT À FAIRE BAISSER LES CONCENTRATIONS DE ²²²RN DANS LES LOGEMENTS ET AUTRES BÂTIMENTS EXISTANTS

ACTIONS CORRECTIVES VISANT À FAIRE BAISSER LES CONCENTRATIONS DE 222 RN

IV-1.Il est établi qu'il est possible, par des actions correctives, de réduire les fortes concentrations de ²²²Rn observées dans des logements existants. Ces actions sont destinées soit à empêcher le ²²²Rn de pénétrer par le sol dans un bâtiment, soit à évacuer le ²²²Rn présent dans le bâtiment grâce à un meilleur renouvellement de l'air intérieur. Leur efficacité dépend de la construction du logement, du climat ainsi que du mode de vie de ses occupants. Étant donné qu'elles ont été pensées pour des régions du monde où se succèdent quatre saisons climatiques bien distinctes, il se pourrait qu'il faille s'assurer de leur applicabilité dans d'autres parties du globe.

IV–2. Les actions correctives se rangent en deux catégories : elles peuvent être actives ou passives. Celles qualifiées de passives ne requièrent aucune forme d'assistance mécanique, tandis que celles dites actives nécessitent une assistance mécanique pour produire un résultat optimal. Les premières consistent, par exemple, à installer des barrières imperméables au ²²²Rn, des évents muraux et des évents de fenêtre. Parmi les secondes figurent notamment la mise en place d'un système de dépressurisation du soubassement assistée par ventilateur conçu pour le ²²²Rn, une aération du soubassement assistée par ventilateur, ou encore une ventilation intérieure mécanique du bâtiment. Les principaux inconvénients des mesures actives sont, d'une part, leur coût et, d'autre part, la nécessité de vérifier régulièrement leur bon fonctionnement et d'en assurer la maintenance sur le long terme. Les mesures passives sont généralement moins onéreuses, mais elles sont aussi moins efficaces que les mesures actives, voire totalement ou partiellement inefficaces.

IV-3. L'application pratique et l'efficacité de ces actions correctives sont décrites ci-après. Leur utilisation doit prendre appui sur des informations techniques plus détaillées, qui peuvent être obtenues dans d'autres sources [IV-1 à IV-4]. Plusieurs autorités nationales ont formulé des recommandations concernant les actions correctives portant sur le ²²²Rn [IV-5] ; ces mesures, de même que d'autres questions liées au problème du ²²²Rn en Europe ont été passées en revue

dans le doc. de réf. [IV-6]. Les actions correctives peuvent varier selon les pays, et certains d'entre eux sont parfois amenés à les élaborer eux-mêmes afin de tenir compte de leurs pratiques nationales en matière de construction.

IV–4. Il arrive aussi que des tests soient effectués pour tenter de savoir quelles seraient les actions correctives les plus appropriées [IV–3]. Il convient d'appliquer ici le principe d'optimisation, c'est-à-dire de produire un effort déterminé qui puisse faire baisser les concentrations de ²²²Rn de manière significative, plutôt que de les ramener juste en-deçà du niveau de référence. Le doc. de réf. [IV–7] donne un exemple d'analyse coût-efficacité et coût-bénéfice appliquée aux actions correctives.

IV-5. Une fois les actions correctives mises en œuvre, il convient de mesurer les concentrations de ²²²Rn et de vérifier qu'elles ont suffisamment diminué.

IV-6. Dans un petit nombre de cas, le ²²²Rn présent à l'intérieur d'un bâtiment peut trouver son origine dans les matériaux utilisés pour sa construction plutôt que le sol sur lequel il a été érigé [IV-8]. Il peut alors s'avérer nécessaire d'envisager de limiter l'utilisation de certains matériaux de construction. Si les matériaux de construction constituent la principale source de radon dans des bâtiments existants, sa concentration dans l'air l'intérieur peut être abaissée en retirant les matériaux qui affichent un taux élevé d'exhalation de radon, en ménageant autour desdits matériaux une fente d'air ventilée ou en intensifiant la ventilation intérieure [IV-9]. L'application de revêtements imperméables sur la surface des matériaux de construction est à éviter, car leur efficacité contre le ²²²Rn est très faible. Ces revêtements de surface peuvent néanmoins être efficaces pour atténuer l'émanation de ²²⁰Rn (voir le par. 3.67).

IV-7. Les pratiques utilisées pour rendre les bâtiments conformes aux normes de rendement énergétique peuvent avoir une influence - positive ou négative - sur les concentrations de ²²²Rn à l'intérieur des logements [IV-10, IV-11]. L'amélioration de l'étanchéité à l'air des bâtiments fait que l'air intérieur et l'air extérieur se mélangent moins. En améliorant l'efficience thermique d'un bâtiment, la température plus élevée de l'air intérieur peut faire baisser la pression à l'intérieur du bâtiment et entraîner ainsi un flux plus important de ²²²Rn entre le sol et le bâtiment. Dans certains pays, les codes de la construction ont été modifiés sur ce point pour éviter les fortes concentrations de ²²²Rn à l'intérieur des bâtiments mis en conformité avec les normes précitées. On trouvera dans le doc. de réf. [IV-12] un exemple de conseils donnés par une autorité nationale concernant la rénovation de l'isolation thermique et ce qu'elle apporte.

VENTILATION ET DÉPRESSURISATION DU SOL

IV-8. Les systèmes de ventilation et de dépressurisation du sol peuvent revêtir diverses formes :

- a) tuyaux perforés placés dans la couche de drainage sous le nouveau plancher, si le plancher existant doit être remplacé;
- tubes perforés insérés par forage dans le sol d'origine sous le plancher existant sans toucher à celui-ci, l'insertion dans le sol pouvant se faire depuis la cave, depuis une fosse d'assemblage dans l'une des pièces du bâtiment, ou depuis l'extérieur;
- c) un siphon d'évacuation du radon placé dans une cavité de la taille d'un seau juste sous la dalle de sol et relié à l'extérieur par un tuyau; ce siphon peut être réalisé en perçant la dalle de sol ou en insérant un tuyau à travers le mur de fondation depuis l'extérieur de l'habitation;
- d) un puisard aménagé sous la bâtisse ou à proximité de celle-ci. La profondeur du puisard est généralement de 3 à 5 m. Il est construit avec des matériaux perméables qui permettent à l'air d'être aspiré du sol adjacent.

Ces systèmes de ventilation et de dépressurisation du sol permettent d'inverser la différence de pression entre le sol situé sous le plancher et la pièce située par-dessus.

IV-9. Un petit ventilateur électrique est généralement placé dans le conduit pour contrôler la dépression - on parle alors de systèmes actifs, par opposition aux systèmes passifs qui n'utilisent pas de ventilateur. Les systèmes passifs reposent sur les différences naturelles de pression dues aux différences de température et aux vents. Ils ont l'avantage de ne générer aucun coût de fonctionnement, d'être totalement silencieux et de ne pas nécessiter de contrôles réguliers ni d'entretien sur le long terme, mais sont bien souvent moins efficaces que les systèmes actifs. Lorsque les concentrations de ²²²Rn atteignent ou dépassent plusieurs centaines de becquerels par mètre cube, les systèmes actifs représentent probablement la meilleure solution.

VENTILATION ACCRUE DU SOUBASSEMENT

IV-10. Dans les logements dotés de planchers suspendus en bois ou en béton, le fait d'intensifier la circulation d'air sous le plancher peut avoir pour effet de diminuer la quantité de ²²²Rn qui pénètre dans le bâtiment. Pour accroître la circulation d'air, il faudra soit installer des bouches ou des briques d'aération

supplémentaires dans le soubassement, soit dégager les bouches ou remplacer les briques existantes. Il existe à présent des briques d'aération en plastique qui offrent une surface d'aérage plus grande que celles des briques d'aération en argile de même taille. Le positionnement de ces briques peut fortement influer sur les résultats obtenus en termes de réduction des concentrations de ²²²Rn : placées dans des espaces morts où l'air ne circule pas, elles perdent en effet de leur efficacité.

IV-11. S'il s'avère que les mesures passives n'ont pas permis d'obtenir la baisse souhaitée des concentrations de ²²²Rn, l'installation d'un ventilateur contribuera à améliorer plus encore l'aération du soubassement. Des ventilateurs peuvent ainsi être installés pour insuffler de l'air dans l'espace situé en sous-sol (ventilation par insufflation) ou pour l'en extraire (ventilation d'extraction). Lors de l'installation d'un ventilateur, il faudra être attentif aux risques éventuels de condensation ou de gel, qui pourraient l'endommager.

MISE SOUS PRESSION POSITIVE

IV-12. La mise sous pression positive visant à abaisser les concentrations de ²²²Rn est une action corrective qui consiste à insuffler de l'air dans le logement ou dans le sous-sol au moyen d'un ventilateur installé à dessein dans le grenier. Ce procédé réduit, voire inverse, la dépression atmosphérique que l'on observe normalement dans un logement par rapport à l'air extérieur, de sorte que la quantité de ²²²Rn qui y entre diminue. L'air peut être aspiré depuis le grenier ou de l'extérieur. Dans les deux cas, de l'air sensiblement plus froid pénètre dans le logement, de sorte qu'il faudra chauffer davantage.

IV-13. La mise sous pression positive convient tout particulièrement aux logements relativement étanches à l'air et s'est avérée plus efficace dans les habitations de plain pied [IV-4]. Les systèmes de mise sous pression positive sont simples à installer et ne nécessitent pas d'interventions structurelles majeures, mais présentent un inconvénient de taille, à savoir la condensation qui en résulte. Cette solution n'est donc pas adaptée aux climats froids. En outre, les coûts de fonctionnement y afférents risquent d'être supérieurs à ceux d'un système de dépressurisation active du sol.

VENTILATION OU DÉPRESSURISATION DES LAMES D'AIR

IV-14. Il est d'usage de créer, autour des constructions (murs et planchers), des lames d'air qui sont en contact direct avec le sol. Le fait de ventiler ou d'induire une légère dépression dans ces espaces vides réduit la quantité de radon transportée du sol vers l'habitation. Les deux systèmes de ventilation - active ou passive - peuvent être ici utilisés. Les lames d'air sont très efficaces dans les constructions qui sont à la fois touchées par la présence de ²²²Rn et par l'humidité.

VENTILATION INTÉRIEURE ACCRUE

- IV-15. Il est possible d'accroître la ventilation d'un logement en dégageant les bouches d'aération, en ajoutant des évents muraux ou en installant des évents de fenêtre. L'intensification de la ventilation favorise le mélange de l'air intérieur riche en ²²²Rn avec l'air extérieur et fait ainsi baisser les concentrations de ²²²Rn dans l'air intérieur. L'installation ou le dégagement de bouches d'aération permet également de réduire la dépression observée dans un logement et, partant, d'atténuer la pénétration de ²²²Rn provenant du sol.
- IV-16. Le fait de choisir, pour lutter contre le ²²²Rn, une action corrective consistant à accroître la ventilation de fond doit uniquement concerner les pièces situées au rez-de-chaussée. Une augmentation de la ventilation dans les étages supérieurs pourrait entraîner des concentrations plus élevées de ²²²Rn, car cela risquerait de provoquer un effet de tirage, c'est-à-dire d'aspirer l'air vers la partie haute de l'habitation.
- IV-17. Les concentrations les plus fortes de ²²²Rn sont souvent observées là où la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur est la plus grande, de sorte qu'une intensification de la ventilation ne sera vraisemblablement pas une solution efficace, à moins que le propriétaire ne soit prêt à maintenir un taux élevé de ventilation tout au long de l'hiver [IV-7].
- IV-18. Une ventilation naturelle accrue a l'avantage d'être une solution entièrement passive, qui ne requiert donc aucun entretien sur le long terme. Elle peut également contribuer à améliorer la qualité de l'air intérieur d'une manière générale.
- IV-19. Un système de ventilation avec récupération de chaleur (doté d'un échangeur de chaleur air-air) est un système motorisé qui permet d'accroître la ventilation d'un logement tout en chauffant ou, le cas échéant, en refroidissant

l'air entrant avec l'air extrait. Ces systèmes sont également susceptibles de favoriser une baisse des concentrations de ²²²Rn dans l'air intérieur.

IV-20. Les systèmes de climatisation peuvent avoir une incidence sur l'intrusion de ²²²Rn venant du sol. Il est important de préserver l'équilibre entre l'air entrant et l'air sortant afin que le système de climatisation crée non pas une dépression dans l'habitation mais, si possible, une légère surpression. Dès lors que le système de climatisation accroît le taux de ventilation d'un logement, il contribuera aussi à réduire les concentrations de ²²²Rn en diluant celui-ci à l'intérieur de l'habitation.

ÉTANCHÉITÉ DES PLANCHERS ET DES MURS

- IV-21. Il est en théorie possible d'empêcher le ²²²Rn provenant du sol de pénétrer dans une habitation en scellant tous ses points d'entrée, tels que les fissures présentes dans les planchers solides, les fissures ou ouvertures survenues dans les murs en contact avec le sol, ainsi que les interstices autour des câbles et conduites. En pratique cependant, il est souvent très difficile de réaliser un scellement efficace et il sera préférable, pour obtenir de bons résultats, d'appliquer cette méthode en conjonction avec d'autres procédés plutôt qu'isolément.
- IV-22. Le scellement de toutes les voies d'entrée que peut emprunter le ²²²Rn pour pénétrer dans une habitation à partir du sol nécessite de retirer revêtements et plinthes, puis de boucher tous les joints et toutes les fissures à l'aide d'un enduit d'étanchéité approprié, suffisamment résistant et souple pour s'adapter aux mouvements futurs des structures de la bâtisse.
- IV-23. Pour que cette méthode de scellement donne de bons résultats, il faut que tous les interstices soient scellés. Il arrive cependant que certains d'entre eux ne soient pas visibles et que de nouvelles fissures et ouvertures apparaissent au fil du temps. Par ailleurs, les interstices restants pourraient laisser passer un flux plus important de ²²²Rn. Par conséquent, il se pourrait que cette solution n'aboutisse qu'à de faibles réductions des concentrations de ²²²Rn.
- IV-24. Si le sol sous un plancher suspendu peut être recouvert d'une membrane (dans une habitation construite sur un vide sanitaire, par exemple), cette solution pourrait constituer une action corrective intéressante pour abaisser les concentrations de ²²²Rn, surtout si elle est combinée à l'utilisation d'une pompe permettant d'atténuer la pression sous la membrane (comme le ferait un siphon).

L'application directe d'une membrane sur un plancher en bois nécessite la plus grande prudence ; à défaut, le bois risque en effet de pourrir.

RÉFÉRENCES RELATIVES À L'ANNEXE IV

- [IV-1] SCIVYER, C., Surveying Dwellings with High Indoor Radon Levels: A BRE Guide to Radon Remedial Measures in Existing Dwellings, Building Research Establishment, BRE Report No. 250, BRE, Garston (1993).
- [IV-2] UNITED KINGDOM BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT, "Buildings and radon", BRE Good Building Guides and Good Repair Guides: A Library of Information for all Construction Professionals, BRE, Garston (2013).
- [IV-3] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Consumer's Guide to Radon Reduction (2013), http://www.epa.gov/radon/pubs/consguid.html
- [IV-4] NAISMITH, S.P., MILES, J.C.H., SCIVYER, C.R., The influence of house characteristics on the effectiveness of radon remedial measures, Health Phys. 75 (1998) 410–416.
- [IV–5] ÖSTERREICHISCHE AGENTUR FÜR GESUNDHEIT UND ERNÄHRUNGSSICHERHEIT, MINISTERIUM FÜR UMWELT NATURSCHUTZ UND VERKEHR BADEN-WÜRTTEMBERG, BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDESAGENTUR FÜR UMWELT BOZEN, SWISS FEDERAL OFFICE OF PUBLIC HEALTH, AMT DER OBERÖSTERREICHISCHE LANDESREGIERUNG, Radon Mitigation measures in existing buildings (2011), http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00046/11592/index.html?lang=en&dow nload=NHzLpZig7t,lnp6I0NTU04212Z6In1ad1IZn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCJfH19e 2ym162dpYbUzd,Gpd6emK2Oz9aGodetmqaN19XI2IdvoaCVZ,s-
- [IV-6] SWEDJEMARK, G.A., The history of radon from a Swedish perspective, Radiat. Prot. Dosim. 109 (2004) 421-426.
- [IV-7] JIRÁNEK, M., ROVENSKÁ, K., Limited applicability of cost-effectiveness and cost-benefit analyses for the optimization of radon remedial measures, J. Hazard. Mater. 182 (2010) 439-446.
- [IV-8] CZECH OFFICE FOR STANDARDS, Protection of Buildings against Radon from the Soil, Czech Office for Standards, Metrology and Testing, CSN 730601 (2006).
- [IV-9] CZECH OFFICE FOR STANDARDS, Protection of Buildings against Radon and Gamma Radiation from Building Materials, Czech Office for Standards, Metrology and Testing, CSN 730602 (2000).
- [IV-10] JIRANEK, M., KACMARIKOVA, V., Dealing with the increased radon concentration in thermally retrofitted buildings, Radiat. Prot. Dosim. 160 (2014) 43–47.
- [IV-11] FOJTIKOVA, I., NAVRATILOVA ROVENSKA, K., Influence of energy-saving measures on the radon concentration in some kindergartens in the Czech Republic, Radiat. Prot. Dosim. 160 (2014) 149–153.

[IV-12] ÖSTERREICHISCHE AGENTUR FÜR GESUNDHEIT UND ERNÄHRUNGSSICHERHEIT, MINISTERIUM FÜR UMWELT NATURSCHUTZ UND VERKEHR BADEN-WÜRTTEMBERG, BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDESAGENTUR FÜR UMWELT BOZEN, SWISS FEDERAL OFFICE OF PUBLIC HEALTH, AMT DER OBERÖSTERREICHISCHE LANDESREGIERUNG, Radon – The effect of retrofitting thermal insulation (2011),

http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00046/11592/index.html?lang=en&download=NHzLpZig7t,lnp6I0NTU042l2Z6ln1ad1IZn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCJfH18gWym162dpYbUzd,Gpd6emK2Oz9aGodetmqaN19XI2IdvoaCVZ,s-

Annexe V

CAMPAGNES D'INFORMATION DU PUBLIC SUR LES RISQUES IMPUTABLES AU RADON

- V-1. D'une manière générale, le radon suscite auprès du public moins d'inquiétude qu'il n'en éprouve vis-à-vis d'autres risques comparables, ou de risques bien plus faibles tels que ceux associés aux rayonnements artificiels. Selon les travaux de Lee [V-1], le public tend à se préoccuper davantage des dangers :
- a) d'origine humaine plutôt que d'origine naturelle ;
- b) qui sont la conséquence d'une intervention de l'homme plutôt que le fruit du hasard :
- c) susceptibles de nuire à des groupes plutôt qu'à des individus ;
- d) évidents, immédiats et « redoutables » plutôt que masqués, lointains et familiers.
- V-2. Aucun des quatre facteurs susmentionnés qui susciteraient des craintes plus vives ne s'applique au radon, à propos duquel une étude indique que la plupart des propriétaires considèrent qu'il ne présente pas de risque pour la santé [V-2]. Aussi convient-il de mener des campagnes d'information afin d'inciter le public à prendre au sérieux les risques imputables au radon.
- V–3. Conscientes de cette nécessité, les autorités de nombreux États ont pris des mesures pour attirer l'attention de la population sur ces risques. Quelle que soit l'approche spécifique retenue pour mieux l'y sensibiliser, elle suppose, pour avancer dans cette voie, que des efforts soient engagés sur le long terme par plusieurs parties : l'État et les collectivités territoriales, les autorités sanitaires, les organisations nationales et internationales de radioprotection et de protection de l'environnement, les organismes de réglementation et les citoyens. Les activités de sensibilisation au radon mises en œuvre en Europe sont décrites dans les compilations de Scivyer [V–3, V–4] ainsi que dans les travaux du groupe de prévention et d'élimination du radon de la Commission européenne, qui abordent également la question de la communication des risques [V–5].
- V-4. Les propriétaires de structures bâties constituent peut-être le groupe cible le plus important des activités de sensibilisation au radon, mais il ne faudrait pas pour autant négliger le personnel des administrations locales, les inspecteurs, les travailleurs des entreprises du bâtiment, les professionnels du logement, les

agents immobiliers, les avocats, les membres des professions de santé et des services de sécurité, ou encore le corps médical. Le message général qui doit leur être transmis est le même pour tous, mais son orientation spécifique, son degré de précision et sa mise en valeur devront être adaptés aux besoins particuliers des uns et des autres.

V-5. La mise à disposition d'informations écrites aisément compréhensibles (éventuellement consultables sur Internet) et accessibles aux non-spécialistes est d'une grande importance. En voici quelques exemples :

- A Citizen's Guide to Radon: The Guide to Protecting Yourself and Your Family from Radon [V-6];
- Home Buyer's and Seller's Guide to Radon [V-7];
- Radon: A Guide for Canadian Homeowners [V–8];
- Understanding Radon Remediation: A Householder's Guide [V–9];
- Radon Hauptursache der natürlichen Strahlenexposition (Radon Main Source of Natural Radiation); Radon in Häusern (Radon in Houses);
 Maßnahmen zum Schutz vor erhöhten Radonkonzentrationen in Gebäuden (Measures to protect against high concentrations of radon in buildings) [V-10];
- Das radonHandbuch Deutschland (Radon Handbook Germany) [V-11];
- Radon Don't Live with the Risk [V–12];
- Vågen till ett radonfritt boende (Living safely with radon) [V–13];
- Rischio radon: cosa è, come si previene, come si misura, come si interviene
 13 quesiti sul problema Radon (The Hazard of Radon: What it is, how it is prevented, how it is measured, how it is mitigated 13 questions on the radon problem) [V-14];
- The Risks to Your Health from Radon [V–15];
- Le radon dans le bâtiment Guide pour la remédiation dans les constructions existantes et la prévention dans les constructions neuves (Radon in buildings — Guide for remediation in existing constructions and prevention in new constructions) [V-16];
- National Action Plan concerning Radon 2012 2020 [V–17];
- Radon: Informations sur un thème « rayonnant » (Radon: Information on a 'radiating' topic) [V–18].

V-6. Les campagnes d'envergure nationale sont utiles pour faire prendre conscience du problème de santé publique que représente l'exposition due au radon. Cela étant, les campagnes de mesure du radon et celles portant sur les actions correctives peuvent s'avérer plus efficaces si elles sont déployées au plan local [V-19, V-20]. Cela s'explique à la fois par le fait que les citoyens

et les élus connaissent mieux la situation propre à leur région et par le fait que le public se montre quelquefois moins sceptique à l'égard des messages qui lui sont adressés par des responsables locaux. Les campagnes locales sont l'occasion de distribuer des dépliants plus spécialement ciblés sur les préoccupations locales et permettent de recourir à des méthodes de diffusion peu coûteuses et efficaces, telles que des présentoirs dans les bibliothèques et les services publics. L'organisation de campagnes sur le radon qui font intervenir des professionnels connaissant bien la question peut grandement contribuer à réduire les risques dus au radon en incitant à mesurer les taux de radon et en encourageant la mise en place d'actions correctives. Au nombre de ces professionnels figurent le personnel des administrations locales, les inspecteurs, les travailleurs des entreprises du bâtiment, les professionnels du logement, les agents immobiliers, les avocats, les membres des professions de santé et des services de sécurité, ou encore le corps médical.

V-7. Les moyens d'information électroniques et la presse écrite ont un rôle important à jouer dans les campagnes consacrées au radon. Il faut que le message relayé dans la presse nationale et locale soit cohérent. Les stations de radio locales peuvent aussi apporter une précieuse contribution. Les articles publiés dans des revues spécialisées et des bulletins d'information destinés à des organismes et professions spécifiques, outre l'intérêt en soi qu'ils présentent, pourront également venir étayer les campagnes de sensibilisation [V-21, V-22].

V-8. Dans l'absolu, il faudrait que les informations puissent aussi être fournies directement aux citoyens. Les visites qu'effectuent les services administratifs locaux dans les logements prennent du temps mais peuvent s'avérer très efficaces pour encourager les propriétaires à engager des actions correctives. Des démonstrations ou des soirées citoyennes animées par le personnel des collectivités locales et des experts nationaux sont également utiles pour atténuer les risques dus au radon en ce qu'elles incitent à prendre des initiatives pour y remédier. Les services d'appui à distance, tels que les lignes d'assistance téléphonique et les sites web, sont un bon moyen de prodiguer informations et conseils à peu de frais.

RÉFÉRENCES RELATIVES À L'ANNEXE V

- [V-1] LEE, T.R., The public's perception of radon, Radiat. Prot. Dosim. 42 (1992) 257–262.
- [V-2] ZHANG, W., CHOW, Y., MEARA, J., GREEN, M., Evaluation and equity audit of the domestic radon programme in England, Health Policy **102** (2011) 81–88.

- [V-3] SCIVYER, S., Review of Radon Awareness Activities in Europe, Building Research Establishment, Garston (2005).
- [V-4] SCIVYER, S., Compilation of Responses to Radon Public Awareness Raising Questionnaires 2002–2003, Building Research Establishment, Garston (2005).
- [V-5] EUROPEAN COMMISSION, Radon Prevention and Remediation: Overview and Background (2014), http://web.jrc.ec.europa.eu/radpar/
- [V-6] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, A Citizen's Guide to Radon: The Guide to Protecting Yourself and Your Family from Radon, US EPA (2012), http://www.epa.gov/radon/pubs/citguide.html
- [V-7] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Home Buyer's and Seller's Guide to Radon (2013), http://www.epa.gov/radon/pubs/hmbyguid.html
- [V-8] SOCIÉTÉ CANADIENNE D'HYPOTHÈQUES ET DE LOGEMENT, SANTÉ CANADA, Radon : guide à l'usage des propriétaires canadiens, SCHL et Santé Canada, Ottawa (1997).
- [V–9] RADIOLOGICAL PROTECTION INSTITUTE OF IRELAND, Understanding Radon Remediation: A Householder's Guide, RPII, Dublin (1997).
- [V-10] BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ, Radon Hauptursache der natürlichen Strahlenexposition (2013), http://www.bfs.de/de/bfs/publikationen/broschueren/ionisierende strahlung/radon/
- [V-11] BUNDESUMWELTMINISTERIUM (BMU), BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ (BfS), Das radon-Handbuch Deutschland, BMU, Bonn (2001).
- [V-12] HEALTH PROTECTION AGENY, Radon don't live with the risk, Health Protection Agency, Chilton, Didcot (2005), http://www.doeni.gov.uk/niea/radon_at_home at work booklet.pdf
- [V-13] STATENSSTRALSKYDDS-INSTITUT (Swedish Radiation Safety Authority), Vågen till ett radonfritt boende (2009), http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/Global/Publikationer/Broschyr/2009/ Faktablad Vagen till ett radonfritt boende2.pdf
- [V-14] ASSOCIAZIONE NAZIONALE PROFESSIONALE ESPERTI QUALIFICATI, Rischio radon: cosa è, come si previene, come si misura, come si interviene — 13 quesiti sul problema Radon (2003), http://www.anpeq.it/anpeq/download/libretto radon.pdf
- [V-15] UNITED KINGDOM HEALTH PROTECTION AGENCY, The Risks to your Health from Radon (2009), http://www.ukradon.org/article.php?key=risksradon
- [V-16] CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BÂTIMENT, Le radon dans les bâtiments, Guide pour la remédiation dans les constructions existantes et la prévention dans les constructions neuves, CSTB, Paris (2008).

- [V-17] SWISS FEDERAL OFFICE OF PUBLIC HEALTH, National Action Plan concerning Radon 2012–2020, Bern (2011), http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00046/11649/index.html?lang=en
- [V-18] OFFICE FÉDÉRAL SUISSE DE LA SANTÉ PUBLIQUE, Radon: Informations sur un Thème « Rayonnant » (2008), http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00046/index.html?lang=en
- [V-19] POORTINGA, W., BRONSTERING, K., LANNON, S., Awareness and perceptions of the risks of exposure to indoor radon: a population-based approach to evaluate a radon awareness and testing campaign in England and Wales, Risk Anal. 31 (2011) 1800–1812.
- [V–20] KENDALL, G.M., GREEN, B.M.R., MILES, J.C.H., DIXON, D.W., The development of the UK radon programme, J. Radiol. Prot. 25 4 (2005) 475–492.
- [V-21] POORTINGA, W., BRONSTERING, K., LANNON, S.C., Awareness and perceptions of the risks of exposure to indoor radon: A population-based approach to evaluate a radon awareness and testing campaign in England and Wales, Risk Anal. 31 (2011) 1800–1812.
- [V–22] FOJTIKOVA, I., ROVENSKA, K., Radon programmes and health marketing, Radiat. Prot. Dosim. 145 (2011) 92–95.

Annexe VI

APPLICATION DES ALGORITHMES DE VÉRIFICATION DE LA CONFORMITÉ DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

MÉTHODE UTILISÉE POUR L'ÉVALUATION DES DOSES PROVENANT DE MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

VI-1. La présente annexe propose une méthode de calcul des doses d'exposition imputables aux rayonnements gamma externes provenant de matériaux de construction, fondée sur l'approche retenue par Markkanen [VI-1]. Les résultats ainsi obtenus sont présentés sous la forme de tableaux indiquant les débits de dose spécifiques, ce qui permet d'établir les évaluations de dose les plus courantes sans avoir recours à des calculs informatiques. On trouvera ci-après cinq exemples d'évaluations réalisées selon cette méthode.

VI-2. La méthode repose sur le calcul du débit de dose pour un bâtiment rectangulaire construit en matériaux de densité uniforme et contenant des radionucléides dont la concentration d'activité est elle aussi uniforme. Le débit de dose à l'intérieur du bâtiment est établi en additionnant les débits de dose calculés séparément à partir des radionucléides présents dans les murs, le plancher et le plafond d'une pièce, comme illustré dans la figure VI-1. Les portes et fenêtres de la bâtisse ont peu d'effet en termes de réduction du débit de dose, de sorte qu'elles ne sont pas prises en compte dans le calcul, dans un souci de simplification. Le calcul s'applique à des cas de figure dans lesquels les radionucléides sont répartis sur deux couches de matériaux de construction distincts de densités et de concentrations d'activité différentes - des murs en béton recouverts d'une fine couche d'un autre matériau tel que du carrelage, par exemple.

VI-3. Bien souvent, les matériaux de construction offrent eux-mêmes une protection non négligeable contre le rayonnement gamma d'origine tellurique. Les structures en béton armé confèrent une protection quasi totale. Le niveau de référence de 1 mSv/a retenu pour les matériaux de construction correspond à l'« exposition excédentaire » causée par ces matériaux par rapport à l'exposition due aux niveaux de rayonnement de fond normaux. La détermination de l'« exposition excédentaire » se fait, pour l'essentiel, comme suit :

- a) La première étape consiste à calculer l'exposition totale due aux matériaux de construction et aux niveaux de fond, en tenant compte de la protection offerte par ces matériaux contre le rayonnement gamma d'origine tellurique.
- b) L'exposition due au rayonnement gamma d'origine tellurique est ensuite soustraite de ce résultat.
- c) En comparant celui-ci avec le niveau de référence, on obtient ce que l'on appelle l'« exposition excédentaire ».

VI-4.Les calculs donnés ci-après à titre d'exemples partent de l'hypothèse, s'agissant du rayonnement gamma d'origine tellurique, d'un débit de dose moyen mondial pondéré par la population de 60 nGy/h [VI-2]. Pour connaître la valeur propre aux différents pays, il conviendra d'utiliser le niveau de rayonnement gamma d'origine tellurique qui leur est applicable. La protection que peuvent offrir les matériaux de construction contre le rayonnement cosmique est considérée comme faible, de sorte que l'exposition imputable à celui-ci n'est pas prise en considération dans les évaluations.

VI-5. Le débit de dose gamma est calculé au milieu de la pièce de taille standard représentée dans la figure VI-1. Les débits de dose gamma spécifiques induits par les murs, le plancher et le plafond sont renseignés dans le tableau VI-1. Le débit de dose total à l'intérieur de l'habitation s'obtient en additionnant les débits de dose calculés séparément pour les murs, le plancher et le plafond. On trouvera dans les exemples 1 à 5 diverses évaluations de la dose telles qu'elles résultent des débits de dose spécifiques indiqués dans le tableau VI-1. Ces exemples concernent des structures en béton armé (par exemple, des immeubles d'habitation) ainsi qu'un type de structure plus petite et plus simple, à l'image de celles que l'on rencontre très souvent dans les zones rurales des pays en développement.

VI-6. Le facteur de conversion utilisé pour convertir la dose absorbée dans l'air en dose effective est de 0,7 Sv/Gy [VI-3].

VI–7. Les travaux de Risica et al., qui se sont livrés à une analyse de sensibilité portant sur les effets générés par une modification des paramètres de la pièce sur la dose de débit observée dans celle-ci ont abouti aux résultats ci-après [VI–4]:

a) Il a été constaté que la variation du débit de dose dans l'air selon la position dans la pièce était de l'ordre de 10 % maximum à une distance allant jusqu'à 1 mètre des murs.

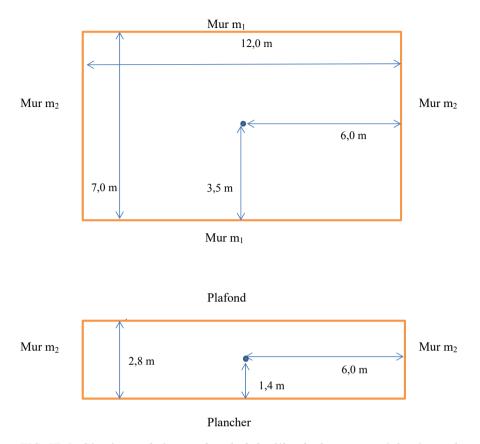


FIG. VI–1. Géométrie utilisée pour le calcul du débit de dose gamma à l'intérieur d'un bâtiment imputable aux matériaux de construction¹.

- b) Le débit de dose absorbée dans l'air a été calculé en fonction des dimensions de la pièce pour une hauteur fixe de 2,8 m et pour différentes largeurs et longueurs comprises entre 2 et 10 m, avec des agencements rectangulaires et carrés. La variation maximale du débit de dose ainsi obtenue a été de 6 % par rapport au résultat calculé pour une pièce d'un volume de 60 m³.
- c) Le débit de dose absorbée dans l'air de la pièce a été calculé en fonction de l'épaisseur des murs, du plancher et du plafond. Il a été constaté que,

 $^{^{1}}$ Les débits de dose sont calculés au point central de la pièce. Il est établi que, du fait de la géométrie d'exposition de type 4π , les débits de dose aux autres points de la pièce ne s'écartent pas de plus de 5 à 10 % de ceux calculés au point central. Le débit de dose au point central constitue par conséquent une bonne approximation du débit de dose valable pour l'ensemble de la pièce.

jusqu'à 0,4 m, toute augmentation de leur épaisseur se traduit par une hausse du débit de dose de rayonnement, tandis que, lorsque leur épaisseur dépasse 0,4 m, les propriétés d'auto-absorption des matériaux font qu'une augmentation supplémentaire de leur épaisseur a des effets négligeables sur le débit de dose.

On peut donc conclure que la variation du débit de dose dans la pièce modèle n'est pas sensiblement affectée pour des pièces d'une superficie allant de 12 à 100 m² et d'une hauteur fixe de 2,8 m, ni pour des épaisseurs de murs variables.

TABLEAU VI–1. DÉBIT DE DOSE GAMMA SPÉCIFIQUE DANS L'AIR ASSOCIÉ AUX DIFFÉRENTES STRUCTURES DE LA PIÈCE REPRÉSENTÉE DANS LA FIGURE VI–1

Masse surfacique du matériau de construction utilisé pour les murs, le plafond ou le	m	nux utilisés purs, le plafor ou le planche che supérieu	nd er	0,2 1'ar	nche de béton m d'épaisse rière du mur nd ou du plar	ur à , du
plancher a (kg/m ²)	(pC	3y/h par Bq/	kg)	(p0	Gy/h par Bq/	kg)
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
$Mur m_1$: dimensions 1.	$2.0 \text{ m} \times 2.8 \text{ m}$	m ; distance	3,5 m			
0	0	0	0	95	110	8,0
25	9	10	0,73	87	100	7,3
50	18	21	1,5	80	94	6,7
100	35	40	2,8	65	77	5,6
150	50	56	3,9	52	62	4,6
200	61	70	4,9	40	50	3,8
300	79	91	6,4	24	31	2,5
500	96	110	8,1	8	12	1,0

TABLEAU VI–1. DÉBIT DE DOSE GAMMA SPÉCIFIQUE DANS L'AIR ASSOCIÉ AUX DIFFÉRENTES STRUCTURES DE LA PIÈCE REPRÉSENTÉE DANS LA FIGURE VI–1 (suite)

Masse surfacique du matériau de construction utilisé pour les murs,	m o	Matériaux utilisés pour les murs, le plafond ou le plancher (couche supérieure) ^b		Couche de béton de 0,2 m d'épaisseur à l'arrière du mur, du plafond ou du plancher ^c		
le plafond ou le plancher a (kg/m²)	(pC	3y/h par Bq/	kg)	(pC	3y/h par Bq/	kg)
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
Mur m ₂ : dimensions 7	$7.0 \text{ m} \times 2.8 \text{ m}$; distance (б,0 m			
0	0	0	0	32	37	2,7
25	2,7	3,1	0,22	30	35	2,5
50	5,5	6,2	0,44	28	32	2,3
100	11	12	0,85	22	27	2,0
150	15	18	1,2	19	23	1,7
200	20	22	1,6	16	19	1,4
300	26	30	2,1	10	13	1,0
500	33	38	2,7	3,7	5,4	0,45
Plancher ou plafond :	dimensions I	$12.0 \text{ m} \times 7.0$	m ; distan	ce 1,4 m		
0	0	0	0	350	420	30
25	46	52	3,7	310	370	27
50	90	100	7,1	270	330	24
100	160	190	13	200	250	18
150	220	250	18	150	180	14
200	260	300	21	110	140	11

TABLEAU VI–1. DÉBIT DE DOSE GAMMA SPÉCIFIQUE DANS L'AIR ASSOCIÉ AUX DIFFÉRENTES STRUCTURES DE LA PIÈCE REPRÉSENTÉE DANS LA FIGURE VI–1 (suite)

Masse surfacique		Matériaux utilisés pour les			iche de bétoi	
du matériau de		murs, le plafond		0,2 m d'épaisseur à		
construction utilisé		ou le planche			l'arrière du mur, du	
pour les murs,	(cou	che supérieu	ıre) ⁰	plafor	plafond ou du plancher c	
le plafond ou le	((3 /1 D /	1 \	((3 /1 D /	1 \
plancher a (kg/m ²)	(pc	Gy/h par Bq/	Kg)	(pc	Gy/h par Bq/	Kg)
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
300	310	360	26	56	78	6,3
500	350	420	30	15	27	2,2

- La masse surfacique du mur, du plancher ou du plafond est le produit de l'épaisseur de la structure multipliée par sa densité. Pour un mur de 0,15 m d'épaisseur constitué d'éléments de construction d'une densité de 2 000 kg/m³ par exemple, la masse surfacique du mur est de 0,15 m × 2 000 kg/m³ = 300 kg/m².
- Il s'agit du débit de dose imputable au mur m₁ ou m₂, au plancher ou au plafond, qui ont une certaine masse surfacique. Si, par exemple, le mur m₁ a une masse surfacique de 300 kg/m² et si la concentration d'activité du ²²⁶Ra est de 100 Bq/kg, le débit de dose imputable au ²²⁶Ra présent dans le mur m₁ est de (79 pGy/h par Bq/kg) × (100 Bq/kg) = 7 900 pGy/h = 7,9 nGy/h = 0,007 9 μGv/h. La « couche supérieure » indiquée entre parenthèses concerne les cas où la structure du mur, du plafond ou du plancher comprend deux couches de matériaux différents du carrelage en surface et une structure en béton par derrière, par exemple. Dans ce cas, les débits de dose spécifiques renseignés dans cette colonne peuvent être utilisés pour les matériaux de la « couche supérieure », comme le carrelage.
- Dans l'hypothèse d'une structure à deux couches (voir note de bas de page b), cette colonne indique le débit de dose pour une structure en béton de 20 cm d'épaisseur placée derrière la couche supérieure. L'effet protecteur de la couche supérieure est pris en compte et le débit de dose de cette deuxième couche de matériau diminue de ce fait à mesure que la masse surfacique de la couche supérieure augmente.

EXEMPLES D'ÉVALUATIONS DE DOSE

Exemple 1 : Exposition aux rayonnements gamma dans une pièce en béton où les concentrations de ²²⁶Ra et de ²³²Th sont légèrement supérieures à la moyenne

VI-8. Les murs, le plancher et le plafond d'une pièce sont en béton, comme le montre la figure VI-1. Le béton est présumé comporter des concentrations légèrement élevées de radionucléides d'origine naturelle. La pièce est présumée avoir les spécifications indiquées dans le tableau VI-2.

TABLEAU VI–2. EXEMPLE 1 : SPÉCIFICATIONS DE LA PIÈCE REPRÉSENTÉE DANS LA FIGURE VI–1

Radionucléide	Planchers, plafond, murs (béton)
Concentration d'act	
²²⁶ Ra	80 Bq/kg
²³² Th	80 Bq/kg
40 K	800 Bq/kg
Autres paramètres	
Densité du béton	$2~350~kg/m^3$
Épaisseur du béton	0,20 m

VI=9.La masse surfacique des murs, du plancher et du plafond étant de 2 350 kg/m $^3 \times 0,20$ m = 470 kg/m 2 , on utilise les débits de dose spécifiques pour une masse surfacique de 500 kg/m 2 renseignés dans le tableau VI=1. Le débit de dose dans la pièce est calculé comme indiqué dans le tableau VI=3.

TABLEAU VI–3. EXEMPLE 1 : DÉBIT DE DOSE DANS LA PIÈCE TEL OU'INDIQUÉ DANS LA FIGURE VI–1

Source	Calcul	Débit de dose
m ₁ (béton)	$2 \times (96 \times 80 + 110 \times 80 + 8,1 \times 800)$	0,045 9 μGy/h
m ₂ (béton)	$2 \times (33 \times 80 + 38 \times 80 + 2,7 \times 800)$	0,015 7 μGy/h
Plancher et plafond (béton)	$2 \times (350 \times 80 + 420 \times 80 + 30 \times 800)$	0,171 2 μGy/h
Débit de dose total dans une p	ièce (hors rayonnement cosmique)	0,232 8 μGy/h
Rayonnement gamma d'origin en béton du bâtiment le protèg	e tellurique en extérieur : les structures ent de ces rayons	-0,06 μGy/h
Débit de dose excédentaire im	putable aux matériaux de construction	0,172 8 μGy/h
Dose effective excédentaire	$0.7 \text{ Sv/Gy} \times 0.172 \text{ 8 } \mu\text{Gy/h}$	0,121 μSv/h

VI-10. La dose effective annuelle excédentaire pour un occupant dépend de sa durée annuelle d'occupation du logement :

```
Durée d'occupation = 100 % : 8 760 h/a × 0,121 \mu Sv/h = 1 060 \mu Sv/a = 1,1 mSv/a
Durée d'occupation = 80 % : 7 008 h/a × 0,121 \mu Sv/h = 848 \mu Sv/a = 0,85 mSv/a
Durée d'occupation = 60 % : 5 256 h/a × 0,121 \mu Sv/h = 636 \mu Sv/a = 0,64 mSv/a
```

Exemple 2: Exposition aux rayonnements gamma dans une pièce dont les murs ont été réalisés avec des matériaux présentant des concentrations élevées de ²²⁶Ra et de ²³²Th, et dont le plancher et le plafond sont en béton classique

VI–11. Le plancher et le plafond de la pièce représentés dans la figure VI–1 sont en béton, matériau dont la concentration moyenne mondiale pondérée par la population s'établit, dans le sol [VI–2] à 33 Bq/kg pour le ²²⁶Ra, 45 Bq/kg pour le ²³²Th et 420 Bq/kg pour le ⁴⁰K. Les murs sont faits de briques comportant des concentrations légèrement élevées de radionucléides d'origine naturelle. Les spécifications des matériaux sont renseignées dans le tableau VI–4.

TABLEAU VI–4. EXEMPLE 2 : SPÉCIFICATIONS DE LA PIÈCE REPRÉSENTÉE DANS LA FIGURE VI–1

Radionucléide	Plancher, plafond (béton)	Murs (brique)	
	Concentration d'activité	Concentration d'activité	
²²⁶ Ra	33 Bq/kg	200 Bq/kg	
²³² Th	45 Bq/kg	300 Bq/kg	
40 K	420 Bq/kg	1 500 Bq/kg	
Autres paramètres			
Densité du béton	$2~350~kg/m^3$	$2~000~kg/m^3$	
Épaisseur du béton	0,20 m	0,15 m	

VI–12. La masse surfacique des murs étant de 2 000 kg/m 3 × 0,15 m = 300 kg/m 2 et celle du plancher et du plafond étant de 2 350 kg/m 3 x 0,20 m = 470 kg/m 2 , on utilise les débits de dose propres à une masse surfacique de 300 kg/m 2 pour les murs et de 500 kg/m 2 pour le plancher et le plafond, tels que renseignés dans le tableau VI–1. Le débit de dose dans la pièce est calculé comme indiqué dans le tableau VI–5.

TABLEAU VI–5. EXEMPLE 2 : DÉBIT DE DOSE DANS LA PIÈCE TEL QU'INDIQUÉ DANS LA FIGURE VI–1

Source	Calcul	Débit de dose
m ₁ (brique)	2 × (79 × 200 + 91 × 300 + 6,4 × 1 500)	0,105 4 μGy/h
m ₂ (brique)	$2 \times (26 \times 200 + 30 \times 300 + 2,1 \times 1500)$	0,034 7 μGy/h
Plancher et plafond (béton)	$2 \times (350 \times 33 + 420 \times 45 + 30 \times 420)$	0,086 1 μGy/h
Débit de dose total dans un	e pièce (hors rayonnement cosmique)	0,226 2 μGy/h
Rayonnement gamma d'ori en béton du bâtiment le pro	gine tellurique en extérieur : les structures tègent de ces rayons.	-0,06 μGy/h
Débit de dose excédentaire	imputable aux matériaux de construction	0,166 2 μGy/h
Dose effective excédentaire	e 0,7 Sv/Gy × 0,166 2 μGy/h	0,116 μSv/h

VI-13. La dose effective excédentaire annuelle pour un occupant dépend de sa durée annuelle d'occupation du logement :

Durée d'occupation = 100 % : 8 760 h/a × 0,116 $\mu Sv/h$ = 1 016 $\mu Sv/a$ = 1,0 mSv/a Durée d'occupation = 80 % : 7 008 h/a × 0,116 $\mu Sv/h$ = 813 $\mu Sv/a$ = 0,81 mSv/a Durée d'occupation = 60 % : 5 256 h/a × 0,116 $\mu Sv/h$ = 610 $\mu Sv/a$ = 0.61 mSv/a

Exemple 3 : Exposition aux rayonnements gamma dans une pièce en béton avec des murs recouverts de carrelage

VI-14. Les murs, le plancher et le plafond de la pièce représentée dans la figure VI-1 sont en béton et tous les murs sont recouverts d'un carrelage présentant des concentrations élevées de radionucléides d'origine naturelle. Les spécifications des matériaux sont renseignées dans le tableau VI-6.

TABLEAU VI–6. EXEMPLE 3 : SPÉCIFICATIONS DE LA PIÈCE REPRÉSENTÉE DANS LA FIGURE VI–1

Radionucléide	Plancher, plafond, murs (béton)	Murs (recouverts de carrelage)
	Concentration d'activité	Concentration d'activité
²²⁶ Ra	33 Bq/kg	1 200 Bq/kg
²³² Th	45 Bq/kg	1 500 Bq/kg
40 K	420 Bq/kg	1 200 Bq/kg
Autres paramètres		
Densité du béton	$2~350~kg/m^3$	$2~500~\mathrm{kg/m^3}$
Épaisseur du béton	0,20 m	0,01 m

VI–15. La masse surfacique du carrelage étant de 2 500 kg/m 3 × 0,01 m = 25 kg/m 2 , les valeurs correspondantes des débits de dose spécifiques du tableau VI–I sont utilisées comme indiqué dans le tableau VI–7.

TABLEAU VI–7. EXEMPLE 3 : DÉBIT DE DOSE DANS LA PIÈCE TEL OU'INDIQUÉ DANS LA FIGURE VI–1

Source	Calcul	Débit de dose
m ₁ (carrelage)	2 × (9 × 1 200 + 10 × 1 500 + 0,73 × 1 200)	0,053 4 μGy/h
m ₁ (béton à l'arrière du carrelage)	$2 \times (87 \times 33 + 100 \times 45 + 7,3 \times 420)$	0,020 9 μGy/h
m ₂ (carrelage)	$2 \times (2,7 \times 1\ 200 + 3,1 \times 1\ 500 + 0,22 \times 1\ 200)$	0,016 3 μGy/h
m ₂ (béton à l'arrière du carrelage)	$2 \times (30 \times 33 + 35 \times 45 + 2,5 \times 420)$	0,007 2 μGy/h
Plancher et plafond (béton)	$2 \times (350 \times 33 + 420 \times 45 + 30 \times 420)$	0,086 1 μGy/h
Débit de dose total dans une	pièce (hors rayonnement cosmique)	0,183 9 μGy/h
Rayonnement gamma d'orig en béton du bâtiment le prot	ine tellurique en extérieur : les structures ègent de ces rayons	-0,06 μGy/h
Débit de dose excédentaire i	mputable aux matériaux de construction	0,123 9 μGy/h
Dose effective excédentaire	$0.7~Sv/Gy \times 0.123~9~\mu Gy/h$	0,086 7 μSv/h

VI-16. La dose effective annuelle excédentaire pour un occupant dépend de sa durée annuelle d'occupation du logement :

```
Durée d'occupation = 100 % : 8 760 h/a × 0,086 7 \mu Sv/h = 760 \mu Sv/a = 0,76 mSv/a 
Durée d'occupation = 80 % : 7 008 h/a × 0,086 7 \mu Sv/h = 608 \mu Sv/a = 0,61 mSv/a 
Durée d'occupation = 60 % : 5 256 h/a × 0,086 7 \mu Sv/h = 456 \mu Sv/a = 0,46 mSv/a
```

Dans cet exemple, il est intéressant d'analyser plus en détail l'origine de la dose due aux rayonnements gamma et, plus encore, l'importance de la dose excédentaire imputable au carrelage. Le débit de dose imputable au carrelage est de 0,053 4 μ Gy/h + 0,016 3 μ Gy/h = 0,069 7 μ Gy/h ; le débit de dose excédentaire imputable au carrelage est toutefois inférieur à 0,069 7 μ Gy/h car le carrelage diminue le débit de la dose due aux rayonnements gamma provenant du béton

situé derrière lui. Le débit de dose excédentaire imputable au carrelage peut donc être obtenu en calculant le débit de dose dans une pièce dépourvue de carrelage et en le soustrayant du débit de dose total calculé ci-dessus. Le débit de dose pour la pièce sans carrelage est calculé comme indiqué dans l'exemple 1, ce qui donne une valeur de 0,117 $\mu Gy/h$. Le débit de dose excédentaire imputable au carrelage s'établit dans ce cas à 0,183 9 - 0,117 $\mu Gy/h = 0,066$ 9 $\mu Gy/h$; pour un occupant, la dose effective excédentaire due au carrelage est de 0,7 Sv/Gy \times 0,066 9 $\mu Gy/h = 0,046$ 8 $\mu Sv/h$. La dose effective annuelle excédentaire pour un occupant imputable au carrelage dépend de sa durée annuelle d'occupation du logement :

```
Durée d'occupation = 100 % : 8 760 h/a × 0,046 8 \mu Sv/h = 410 \mu Sv/a = 0,41 mSv/a
Durée d'occupation = 80 % : 7 008 h/a × 0,046 8 \mu Sv/h = 328 \mu Sv/a = 0,33 mSv/a
Durée d'occupation = 60 % : 5 256 h/a × 0,046 8 \mu Sv/h = 256 \mu Sv/a = 0.26 mSv/a
```

Exemple 4: Exposition aux rayonnements gamma dans une pièce ceinte de murs légers réalisés avec des matériaux présentant une concentration élevée de ²²⁶Ra

VI–17. Ce modèle concerne un type de construction courante dans les zones rurales des pays en développement. Le plancher et le plafond de la pièce représentée dans la figure VI–1 sont faits de bois, de chaume ou d'un matériau similaire et ne contribuent donc pas à la dose d'exposition imputable aux rayonnements gamma dans un environnement intérieur. La dose d'exposition due aux rayonnements gamma dans un environnement intérieur provient du sous-sol et des murs. Ces derniers sont faits d'éléments creux et légers affichant des concentrations élevées de ²²⁶Ra. Les spécifications des matériaux sont renseignées dans le tableau VI–8.

TABLEAU VI-8. EXEMPLE 4 : SPÉCIFICATIONS DE LA PIÈCE REPRÉSENTÉE DANS LA FIGURE VI-1

Radionucléide	Murs (éléments de construction)		
	Concentration d'activité		
²²⁶ Ra	1 200 Bq/kg		
²³² Th	45 Bq/kg		
40 K	420 Bq/kg		
Autres paramètres			
Densité du béton	$1~000~kg/m^3$		
Épaisseur du béton	0,15 m		

VI–18. La masse surfacique des murs est de 1 000 kg/m 3 × 0,15 m = 150 kg/m 2 . Ni le plafond ni le plancher ne contribuent à la dose. Les murs n'offrent pas de grande protection contre les rayonnements d'origine tellurique, de sorte qu'aucun rayonnement de fond ne doit être soustrait. Le débit de dose dans la pièce est calculé comme indiqué dans le tableau VI–9.

TABLEAU VI–9. EXEMPLE 4 : DÉBIT DE DOSE DANS LA PIÈCE TEL QU'INDIQUÉ DANS LA FIGURE VI–1

Source	Calcul	Débit de dose
m ₁ (élément de construction)	$2 \times (50 \times 1\ 200 + 56 \times 45 + 3,9 \times 420)$	0,128 3 μGy/h
m ₂ (élément de construction)	$2 \times (15 \times 1\ 200 + 18 \times 45 + 1,2 \times 420)$	0,038 6 μGy/h
Débit de dose total dans une	pièce (hors rayonnement cosmique)	0,166 9 μGy/h
plancher, les matériaux de co	gine tellurique en extérieur : en l'absence de onstruction n'offrent que très peu de protection ion, la réduction du débit de dose générée par l e.	·
Débit de dose excédentaire i	mputable aux matériaux de construction	0,166 9 μGy/h
Dose effective excédentaire	0,7 Sv/Gy × 0,166 9 μGy/h	0,116 8 μSv/h

VI-19. La dose effective annuelle excédentaire pour un occupant dépend de sa durée annuelle d'occupation du logement :

Durée d'occupation = 100 % : 8 760 h/a × 0,117 $\mu Sv/h$ = 1 025 $\mu Sv/a$ = 1,0 mSv/a Durée d'occupation = 80 % : 7 008 h/a × 0,117 $\mu Sv/h$ = 820 $\mu Sv/a$ = 0,82 mSv/a Durée d'occupation = 60 % : 5 256 h/a × 0,117 $\mu Sv/h$ = 615 $\mu Sv/a$ = 0.62 mSv/a

Exemple 5: Exposition aux rayonnements gamma dans une pièce ceinte de murs en béton réalisés avec des matériaux présentant une concentration élevée de ²²⁶Ra

VI-20. Ce cas de figure est identique à celui donné dans l'exemple 4, à ceci près que les murs sont en béton et ont une épaisseur de 20 cm. Les spécifications des matériaux sont renseignées dans le tableau VI-10.

TABLEAU VI–10. EXEMPLE 5 : SPÉCIFICATIONS DE LA PIÈCE REPRÉSENTÉE DANS LA FIGURE VI–1

Radionucléide	Murs (béton)	
	Concentration d'activité	
²²⁶ Ra	1 200 Bq/kg	
²³² Th	45 Bq/kg	
40 K	420 Bq/kg	
Autres paramètres		
Densité du béton	$2~350~kg/m^3$	
Épaisseur du béton	0,20 m	

VI–21. La masse surfacique des murs étant de 2 350 kg/m 3 × 0,2 m = 470 kg/m 2 , on utilise les débits de dose propres à une masse surfacique de 500 kg/m 2 renseignés dans le tableau VI–1. Le débit de dose dans la pièce est calculé comme indiqué dans le tableau VI–11.

TABLEAU VI–11. EXEMPLE 5 : DÉBIT DE DOSE DANS LA PIÈCE TEL OU'INDIQUÉ DANS LA FIGURE VI–1

Source	Calcul	Débit de dose
m ₁ (élément de construction)	2 × (96 × 1 200 + 110 × 45 + 8,1 × 420)	0,247 1 μGy/h
m ₂ (élément de construction)	$2 \times (33 \times 1\ 200 + 38 \times 45 + 2,7 \times 420)$	0,084 9 μGy/h
Débit de dose total dans une p	0,332 μGy/h	
Rayonnements gamma d'origi plancher, les matériaux de con dans un souci de simplification ladite protection est présumée	0,00 μGy/h	
Débit de dose excédentaire im	0,332 μGy/h	
Dose effective excédentaire	$0.7~\mathrm{Sv/Gy} \times 0.332~\mu\mathrm{Gy/h}$	0,232 μGy/h

VI-22. La dose effective annuelle excédentaire pour un occupant dépend de sa durée annuelle d'occupation du logement :

Durée d'occupation = 100 % : 8 760 h/a × 0,232 $\mu Sv/h$ = 2 032 $\mu Sv/a$ = 2,0 mSv/a Durée d'occupation = 80 % : 7 008 h/a × 0,232 $\mu Sv/h$ = 1 626 $\mu Sv/a$ = 1,6 mSv/a Durée d'occupation = 60 % : 5 256 h/a × 0,232 $\mu Sv/h$ = 1 219 $\mu Sv/a$ = 1,2 mSv/a

RÉFÉRENCES RELATIVES À L'ANNEXE VI

- [VI-1] MARKKANEN, M., Radiation Dose Assessments for Materials with Elevated Natural Radioactivity, Publication STUK-B-STO 32, Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety, Helsinki (1995).
- [VI-2] UNITED NATIONS, Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly), Annex B: Exposures from Natural Radiation Sources, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (2000).

- [VI-3] UNITED NATIONS, Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly), United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (1993).
- [VI-4] RISICA, S., BOLZAN, C., NUCCETELLI, C., Radioactivity in building materials: Room model analysis and experimental methods, Sci. Total Environ. 272 (2001) 119–126.

PERSONNES AYANT CONTRIBUÉ À LA RÉDACTION ET À L'EXAMEN DU TEXTE

Arvela, H. Autorité de sûreté radiologique et nucléaire (Finlande)

Boal, T.J. Agence internationale de l'énergie atomique

Bradley, J. Agence de protection de la santé (Royaume-Uni)

Colgan, T. Agence internationale de l'énergie atomique

Fojtíkova, I. Institut national de radioprotection

(République tchèque)

Froňka, A. Institut national de radioprotection

(République tchèque)

Hůlka, J. Institut national de radioprotection

(République tchèque)

Jiranek, M. Université technique de Prague (République tchèque)

Markkanen, M. Autorité de sûreté radiologique et nucléaire (Finlande)

Miles, J. Agence de protection de la santé (Royaume-Uni)

Murith, C. Office fédéral de la santé publique, Suisse

Neznal, M. Radon v.o.s. (République tchèque)

Pierre, M.J.R. Ministère de la Défense nationale, Canada

Pravdova, E Autorité nationale de sûreté nucléaire

(République tchèque)

Rovenska, K. Institut national de radioprotection

(République tchèque)

Shannoun, F. Organisation mondiale de la Santé

Thomas, J. Institut national de radioprotection

(République tchèque)

van der Steen, J. Consultant privé (Pays-Bas)

van Deventer, T.E. Organisation mondiale de la Santé

Vlček, J. Institut national de radioprotection

(République tchèque)

Webster, S. Saskatchewan Labour, Canada

Zeeb, H. Organisation mondiale de la Santé



OÙ COMMANDER?

Vous pouvez vous procurer les publications de l'AIEA disponibles à la vente chez nos dépositaires ci-dessous ou dans les grandes librairies.

Les publications non destinées à la vente doivent être commandées directement à l'AIEA. Les coordonnées figurent à la fin de la liste ci-dessous.

AMÉRIQUE DU NORD

Bernan / Rowman & Littlefield

15250 NBN Way, Blue Ridge Summit, PA 17214 (États-Unis d'Amérique)

Téléphone : +1 800 462 6420 • Télécopie : +1 800 338 4550

Courriel: orders@rowman.com • Site web: www.rowman.com/bernan

RESTE DU MONDE

Veuillez-vous adresser à votre libraire préféré ou à notre principal distributeur :

Eurospan Group

Gray's Inn House 127 Clerkenwell Road London EC1R 5DB (Royaume-Uni)

Commandes commerciales et renseignements :

Téléphone : +44 (0) 176 760 4972 • Télécopie : +44 (0) 176 760 1640

Courriel: eurospan@turpin-distribution.com

Commandes individuelles:

www.eurospanbookstore.com/iaea

Pour plus d'informations :

Téléphone : +44 (0) 207 240 0856 • Télécopie : +44 (0) 207 379 0609 Courriel : info@eurospangroup.com • Site web : www.eurospangroup.com

Les commandes de publications destinées ou non à la vente peuvent être adressées directement à :

Unité de la promotion et de la vente

Agence internationale de l'énergie atomique

Centre international de Vienne, B.P. 100, 1400 Vienne (Autriche)

Téléphone: +43 1 2600 22529 ou 22530 • Télécopie: +43 1 26007 22529

Courriel: sales.publications@iaea.org • Site web: https://www.iaea.org/fr/publications

