

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

Nouveaux coefficients de dose pour le radon recommandés par la CIPR dans sa Publication 137

Note explicative

Rapport n° PSE-SANTE/2018-00002

Pôle Santé et Environnement

Table des Matières

1	INTRODUCTION.....	2
2	RAPPELS DE BASE SUR LE RADON	2
3	LES COEFFICIENTS DE DOSE DE LA PUBLICATION 137 DE LA CIPR ET LEURS FONDEMENTS : L'APPROCHE DOSIMETRIQUE.....	3
4	COHERENCE DES COEFFICIENTS DE DOSE PROPOSES AVEC LES DONNEES ISSUES D'UNE APPROCHE EPIDEMIOLOGIQUE	7
5	VARIABILITE ET INCERTITUDES ASSOCIEES AUX APPROCHES DOSIMETRIQUES ET EPIDEMIOLOGIQUES	8
6	CONCLUSION	11
7	REFERENCES.....	12

1 INTRODUCTION

La Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) a diffusé en janvier 2018 sa publication 137 intitulée « Incorporation de radionucléides en milieu du travail - Partie 3 » (ICRP, 2017). Ce document s'inscrit dans une série de publications destinées à fournir, pour les principaux éléments chimiques et leurs isotopes radioactifs, des données de base et les paramètres permettant de décrire la répartition de ces éléments dans l'organisme humain en cas d'incorporation. Les publications proposent pour cela une revue des données et des modèles biocinétiques disponibles et fournissent des facteurs permettant de calculer les doses efficaces associées à l'ingestion ou à l'inhalation des radionucléides concernés. La publication 137 couvre quatorze éléments, dont le radon (Rn).

Le présent document vise à présenter les valeurs des nouveaux coefficients de dose retenues par la CIPR pour l'inhalation de radon, à préciser les hypothèses et données scientifiques sur lesquelles elles reposent et à discuter les incertitudes auxquelles elles sont associées.

Après quelques rappels de base sur le radon au chapitre 2, le chapitre 3 présente les fondements de l'approche dosimétrique sur lesquels repose la définition des coefficients de dose fournis par la publication CIPR 137. Le chapitre 4 examine la cohérence de ces nouvelles valeurs avec celles dérivées de l'approche épidémiologique qui avait été retenue par la CIPR jusqu'ici. La variabilité et les incertitudes associées à la détermination des coefficients de dose sont discutées au chapitre 5. Des éléments de conclusion sont proposés au chapitre 6.

2 RAPPELS DE BASE SUR LE RADON

Le radon est un gaz inerte radioactif, produit naturellement par décroissance des chaînes de l'uranium et du thorium. Ses isotopes les plus abondants sont le radon 222 (^{222}Rn), de 3,8 jours de demi-vie, le radon 220 (^{220}Rn), de 55,6 secondes de demi-vie, communément appelé thoron, et le radon 219 (^{219}Rn), de 3,96 secondes de demi-vie, communément appelé actinon. Compte-tenu des demi-vies respectives de ces isotopes, seul le ^{222}Rn et, dans une moindre mesure, le ^{220}Rn sont susceptibles de générer des doses significatives en cas d'incorporation. Bien que la publication 137 couvre les trois isotopes mentionnés précédemment, seul le cas du ^{222}Rn est évoqué dans la suite du présent rapport. Par souci de simplification, dans la suite du texte, le terme radon désigne indifféremment l'élément ou son isotope 222.

Dans l'air extérieur, le radon se dilue rapidement et sa concentration (ou activité volumique) moyenne reste généralement faible, le plus souvent inférieure à une dizaine de becquerels par mètre-cube ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) d'air. Dans des lieux confinés tels que les mines souterraines, les grottes, mais aussi les bâtiments en général, il peut s'accumuler et atteindre des concentrations élevées atteignant parfois plusieurs milliers de $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Le gaz radon présent dans l'air ambiant se transforme, par désintégration alpha, en descendants solides, eux-mêmes radioactifs à période courte (demi-vie inférieure à 30 minutes). Parmi ces descendants, deux - le polonium 218 et le polonium 214 - sont aussi des émetteurs alpha. Du fait de leur grande mobilité, les

descendants radioactifs à vie courte du radon se fixent sur les molécules de vapeur d'eau ou de gaz sous forme de traces dans l'air (constituant ce qu'on appelle la « fraction libre » de taille de l'ordre du nanomètre) ou aux aérosols atmosphériques (formant la « fraction attachée » dont la taille s'étend de quelques nanomètres au micromètre). Les descendants fixés ou non sur les aérosols diffusent rapidement dans l'atmosphère et finissent par se déposer au sol ou sur les parois des bâtiments si bien que, quel que soit le lieu, ils ne sont jamais totalement à l'équilibre radioactif avec le radon. Les fractions d'équilibre des descendants à période courte du radon avec celui-ci sont décrites par un facteur sans dimension dénommé « facteur d'équilibre »¹. Celui-ci est compris entre 0 (lorsque le radon est présent dans l'air sans descendants) et 1 (lorsque les descendants à période courte du radon sont présents dans l'air avec la même concentration que celui-ci).

Lorsqu'une personne est exposée au radon et à ses descendants à période courte, attachés ou non à des poussières, les descendants inhalés se déposent dans le système respiratoire et l'irradient. La dose délivrée est fonction de la localisation des dépôts, elle-même fonction de la dimension des particules. Les particules les plus fines (en particulier la fraction libre) peuvent atteindre les cellules sensibles de l'épithélium bronchique et les alvéoles pulmonaires et délivrent ainsi des doses plus importantes. Le radon étant un gaz, il est quant à lui en grande partie ré-exhalé et n'irradie que faiblement.

Les études épidémiologiques menées chez les mineurs d'uranium ont révélé un risque de surmortalité par cancer du poumon lié à l'exposition au radon. Des études plus récentes dans la population ont montré que ce risque existe aussi de façon significative pour des expositions domestiques au radon continues à des niveaux de concentration supérieurs à environ 200 Bq.m⁻³. Le radon est reconnu comme cancérigène pulmonaire certain par l'Organisation Mondiale de la Santé depuis 1987. Son action combinée à celle du tabac entraîne un risque relatif de cancer pulmonaire qui se situe entre l'addition et la multiplication des deux risques relatifs.

3 LES COEFFICIENTS DE DOSE DE LA PUBLICATION 137 DE LA CIPR ET LEURS FONDEMENTS : L'APPROCHE DOSIMETRIQUE

La détermination des coefficients de dose proposés par la publication CIPR 137 est fondée sur une approche dite dosimétrique. Celle-ci consiste à rendre compte des phénomènes physiques déterminant la répartition des radionucléides dans l'organisme pour quantifier l'énergie déposée par unité de masse dans les différentes régions du corps et la pondérer suivant la toxicité des rayonnements et la radiosensibilité des tissus. C'est selon cette approche que les coefficients de dose ont toujours été déterminés par la CIPR pour tous les radionucléides, exception faite du radon pour lequel avait été utilisée jusqu'ici une approche épidémiologique (cf. chapitre 4).

¹ C₀ étant la concentration du radon dans l'air, et C₁, C₂ et C₃ celles de ses 3 descendants (respectivement polonium 218, plomb 214 et bismuth 214), le facteur d'équilibre F s'écrit : $F = (0,105 * C_1 + 0,516 * C_2 + 0,379 * C_3) / C_0$

Modèle dosimétrique retenu

Dans le cas de l'inhalation de radon, la contribution principale à la dose efficace provient de l'irradiation alpha des cellules radiosensibles du poumon. Cette irradiation est principalement due aux descendants du radon déposés dans l'appareil respiratoire lors de la respiration. La contribution du gaz radon lui-même est estimée représenter de l'ordre de 2% à 5 % seulement de la dose efficace.

Le modèle respiratoire humain sur lequel repose l'approche dosimétrique adoptée dans la publication CIPR 137 est celui décrit par la publication CIPR 66 (ICRP, 1994). Ce modèle permet d'évaluer la fraction déposée dans les bronches et les alvéoles pulmonaires des aérosols radioactifs inhalés suivant leurs propriétés aérodynamiques et thermodynamiques. Après dépôt, les particules radioactives sont épurées du poumon par transport mécanique vers le tractus alimentaire et par absorption dans le sang. La courte période radioactive des descendants du radon ne permet toutefois pas l'épuration d'une proportion importante de ces radionucléides avant leur désintégration. L'énergie déposée dans les cellules du poumon est calculée en fonction de leur position par rapport aux sites de dépôt des radionucléides et de la portée des particules alpha émises. Le modèle respiratoire retenu considère, par ailleurs, qu'une fraction du gaz radon présent dans l'air du poumon se dissout dans la circulation sanguine qui le distribue dans le corps et provoque une irradiation des autres organes. Comme indiqué plus haut, cette irradiation ne contribue que marginalement à la dose efficace.

Dans le calcul de la dose efficace, un facteur de pondération $w_r = 20$ est attribué à la dose résultant du rayonnement alpha par rapport à celle du rayonnement gamma et un facteur de pondération $w_T = 0,12$ est attribué à la dose pulmonaire par rapport à celle de l'ensemble du corps (ICRP, 2007).

Situations d'exposition considérées

La dose découlant de l'inhalation du radon dépend de paramètres propres aux conditions environnementales et de paramètres liés à la physiologie respiratoire :

- une ventilation importante des locaux, comme dans le cas des mines, réduit la probabilité pour les descendants de se former, diminuant ainsi le facteur d'équilibre et donc la dose délivrée ;
- l'empoussièrément de l'air diminue la fraction libre et, du fait que les descendants attachés sur des poussières ont un poids dosimétrique plus faible que les descendants sous forme libre, la dose délivrée diminue également ;
- une activité physique plus intense accroît le débit respiratoire et, en conséquence, l'activité inhalée du radon et de ses descendants ;
- la taille des aérosols ambiants sur lesquels les descendants sont attachés influe sur leur dépôt dans les voies respiratoires. Ainsi, une taille de poussières comprise entre 1 et 10 nm augmente leur dépôt dans les bronches et les bronchioles et la dose qui en résulte.

Le facteur d'équilibre permet en pratique de convertir une mesure de l'exposition au gaz radon exprimée en becquerels heure par mètre cube ($Bq.h.m^{-3}$) en une exposition aux descendants exprimée en millijoules heure

par mètre cube (mJ.h.m^{-3}) ou en Working Level Month² (WLM).

Dans la plupart des bâtiments, une diminution du facteur d'équilibre est associée à une augmentation de la fraction libre. La dose délivrée variant dans le même sens que ces deux paramètres, leur influence sur l'évaluation de dose à partir de la concentration en radon tend ainsi à se compenser. Pour cela et pour des raisons pratiques, dans les habitations et les lieux de travail habituels, c'est le radon qui est mesuré. La mesure s'exprime alors en becquerels par mètre cube (Bq.m^{-3}). En revanche, dans les mines, fortement ventilées, cette corrélation inverse n'est pas observée et la surveillance est en général basée sur la mesure des descendants. La mesure s'exprime dans ce cas en millijoules par mètre cube (mJ.m^{-3}) ou encore en Working Level³ (WL).

Pour la déclinaison pratique de son approche dosimétrique, la CIPR retient un nombre réduit de situations d'exposition types. Ce choix vise à surmonter la difficulté liée à la multiplicité des paramètres d'influence ci-dessus et à la diversité des conditions envisageables. Il vise également à proposer des éléments opérationnels applicables à la grande majorité des lieux de travail.

Concrètement, la publication CIPR 137 retient quatre situations d'exposition couvrant trois types de lieux : les bâtiments, les mines souterraines et les grottes touristiques. Pour ces trois types de lieux, l'exposition est définie en référence au cas d'un travailleur engagé dans une activité physique les deux tiers de son temps, avec un débit respiratoire moyen de $1,2 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$. Pour les bâtiments, la CIPR considère également le cas d'un individu exerçant une activité de travail sédentaire, de bureau par exemple. Celui-ci est supposé avoir une activité physique légère pendant un tiers du temps et un débit respiratoire moyen de $0,86 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$.

Choix des paramètres d'exposition

Pour calculer des coefficients de dose pour chacune des quatre situations retenues, la CIPR a fixé des valeurs par défaut pour les paramètres essentiels que sont :

- la fraction libre des descendants du radon, qui dépend de la concentration de l'air en aérosols et de la dimension de ces aérosols ;
- le facteur d'équilibre, qui lui-même dépend du taux de ventilation et de la fraction libre ;
- la granulométrie des aérosols, qui influe sur la localisation du dépôt pulmonaire et donc sur la répartition de la dose délivrée entre les différentes régions de l'arbre respiratoire ;
- et enfin l'hygrométrie des lieux qui va influencer sur la taille apparente des particules à l'entrée des voies aériennes supérieures et donc sur leur distribution dans les poumons.

Faute de données précises et disponibles pour toutes les situations d'exposition, la CIPR a émis des hypothèses sur le niveau d'empoussièrément dans les mines, sur la nature des aérosols en fonction du mode de chauffage et sur leur comportement en fonction de l'hygrométrie ambiante. Dans les grottes touristiques, elle a fait également l'hypothèse que l'hygrométrie ambiante modifiait la taille des particules avant leur

² 1 WLM correspond à une exposition à une concentration de $3\,700 \text{ Bq.m}^{-3}$ de radon à l'équilibre avec ses descendants à vie courte sur une durée de 170 heures, considérée représentative de la durée de travail mensuelle

³ 1 WL correspond à une exposition à une concentration de $3\,700 \text{ Bq.m}^{-3}$ de radon à l'équilibre avec ses descendants à vie courte

entrée dans les voies aériennes respiratoires. Elle a enfin émis d'autres hypothèses sur le taux d'empoussièrement moyen dans l'habitat.

Le tableau 1 ci-après récapitule les valeurs des paramètres d'exposition utilisées *in fine* dans la publication 137 de la CIPR pour chacune des quatre situations envisagées et fournit les correspondances entre une exposition, exprimée selon l'une des trois unités évoquées précédemment (Bq.h.m^{-3} , WLM et mJ.h.m^{-3}), et la dose efficace exprimée en mSv.

Tableau 1 : Correspondances entre exposition et dose efficace pour différentes situations de travail

Exposition \ Dose (mSv)	Activité de travail en intérieur	Activité de travail sédentaire en intérieur	Activité de travail en Mine	Activité de travail en Grotte touristique
300 Bq.m^{-3} pendant 2000 h ⁽¹⁾	7,8	5,6	sans objet ⁽²⁾	9
1 WLM	20	14	12	24
1 mJ.h.m^{-3}	5,7	4	3,3	6,7
Valeurs des paramètres d'exposition utilisées				
Débit respiratoire moyen	1,2 $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$	0,86 $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$	1,2 $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$	1,2 $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$
Facteur d'équilibre	0,4	0,4	0,2	0,4
Fraction libre	8%	8%	1%	15%
Diamètre thermodynamique médian en activité de la fraction attachée	30 nm (pour 20%) et 250 nm (pour 80%)	30 nm (pour 20%) et 250 nm (pour 80%)	250 nm	200 nm

¹ Une concentration de 300 Bq.m^{-3} correspond à la valeur de référence proposée par la CIPR dans sa publication 126 pour la gestion du risque radon (ICRP, 2014) et 2000 h est le temps de travail annuel considéré dans la publication 137.

² Dans les mines, l'exposition au radon est contrôlée via la mesure de l'énergie potentielle alpha des descendants (mJ.h.m^{-3})

Les valeurs de référence rappelées dans le tableau pour les divers paramètres ont été retenues par la CIPR de manière à définir des conditions représentatives des conditions ambiantes usuelles et moyennes dans les quatre types de situation choisis. A l'instar de ce que la CIPR propose pour les autres radionucléides avec les types d'absorption pulmonaire rapide (F), moyenne (M), lente (S), gaz et vapeurs (V), les choix effectués pour le radon restent de nature conventionnelle et les situations décrites ne représentent que des situations types. En conséquence, les coefficients de dose efficace donnés pour les bâtiments, les mines, et les grottes touristiques, doivent être appréciés comme des coefficients de référence, utilisables dans les conditions proposées et dans toute autre condition environnementale s'y rapprochant (spas ou installations de captage des eaux par exemple).

Dans le cas où les conditions environnementales de travail seraient très éloignées des conditions types retenues par la CIPR, celle-ci donne les éléments nécessaires au calcul de coefficients de dose qui pourraient être plus appropriés. La CIPR propose ainsi des modalités permettant le calcul des doses en faisant varier la

taille des aérosols selon leur mode de formation ou en faisant varier la fraction libre des descendants du radon.

Il convient de noter que les valeurs figurant dans le tableau 1 sont données ici à titre informatif car, dans la perspective de gestion du risque, la CIPR recommande *in fine* les coefficients de dose indiqués ci-après, qui sont des valeurs arrondies tenant compte des incertitudes associées au modèle dosimétrique (cf. chapitre 5).

Coefficients de dose recommandés

A partir des éléments décrits dans les chapitres précédents, la publication CIPR 137 recommande finalement deux coefficients de dose, renvoyant chacun vers un contexte d'exposition particulier :

- un coefficient de dose de 3 mSv par mJ.h.m⁻³ applicable aux activités exercées dans les mines souterraines ainsi qu'aux activités d'intensité modérée exercées dans des bâtiments. La CIPR considère que ce coefficient de dose est applicable, par défaut, dans la majorité des situations sans nécessiter d'ajustement pour tenir compte des caractéristiques des aérosols (ICRP, 2017 ; Marsh et al., 2017). Exprimé dans l'autre unité d'exposition mentionnée précédemment, le coefficient de dose vaut 10 mSv par WLM.
- un coefficient de dose de 6 mSv par mJ.h.m⁻³ applicable aux activités physiques plus intenses exercées dans les bâtiments ainsi que dans les grottes souterraines touristiques. Exprimé dans l'autre unité d'exposition mentionnée précédemment, le coefficient de dose vaut 20 mSv par WLM.

Tableau 2 : Correspondances entre exposition et dose efficace recommandées par la CIPR

Exposition \ Dose (mSv)	Activité de travail en intérieur	Activité de travail sédentaire en intérieur	Activité de travail en Mine	Activité de travail en Grotte touristique
1 WLM	20	10	10	20
1 mJ.h.m ⁻³	6	3	3	6

4 COHERENCE DES COEFFICIENTS DE DOSE PROPOSES AVEC LES DONNEES ISSUES D'UNE APPROCHE EPIDEMIOLOGIQUE

Avant la parution de la publication 137 de la CIPR, les coefficients de dose radon applicables étaient définis dans la publication 65 parue en 1993 (ICRP, 1993). Ces coefficients étaient basés sur une approche « épidémiologique » consistant à faire correspondre l'exposition au radon entraînant un risque cumulé vie entière de décès par cancer du poumon donné (estimé sur la base des études épidémiologiques de mineurs d'uranium) à la dose 'corps entier' entraînant un détriment identique (estimé d'après l'étude des survivants des bombardements atomiques de Hiroshima et Nagasaki) (ICRP, 1993).

Sur la base des données épidémiologiques disponibles en 1993, le risque de cancer du poumon par unité d'exposition était estimé à $2,83.10^{-4}$ par WLM. En tenant compte du détriment total (cancer et effets héréditaires) donné par la Publication 60 de la CIPR (ICRP, 1991), soit $5,6.10^{-2}$ par Sv pour les travailleurs et $7,3.10^{-2}$ par Sv pour le public, les coefficients de dose dérivés étaient les suivants (ICRP, 1993) :

- 5 mSv par WLM pour les travailleurs ($2,83.10^{-4}$ par WLM divisé par $5,6.10^{-2}$ par Sv) ;
- 4 mSv par WLM pour le public ($2,83.10^{-4}$ par WLM divisé par $7,3.10^{-2}$ par Sv).

En 2010, la Publication 115 de la CIPR a réalisé une mise à jour du risque de cancer du poumon dû au radon et ses descendants basée sur les données épidémiologiques récentes dérivées d'études de mineurs d'uranium faiblement exposés et d'études en population générale (ICRP, 2010). Les études épidémiologiques récentes, notamment en population générale, ont conduit à une réévaluation à la hausse du risque de cancer du poumon après inhalation du radon dans les habitations, à la fois pour les fumeurs et pour les non-fumeurs. L'analyse de l'ensemble des données épidémiologiques a montré que le risque vie entière de décès par cancer du poumon chez les adultes ayant été exposés de façon chronique à de faibles concentrations de radon était de 5.10^{-4} par WLM, soit environ 2 fois plus élevé que celui de $2,83.10^{-4}$ par WLM estimé en 1993 sur la base des connaissances alors disponibles.

Sur cette base et en tenant compte des nouvelles valeurs de détriment total données par la Publication 103 de la CIPR (ICRP, 2007), soit $4,2.10^{-2}$ par Sv pour les travailleurs et $5,7.10^{-2}$ par Sv pour le public, le coefficient de dose estimé par l'approche épidémiologique était :

- de 12 mSv par WLM (ou 3,3 mSv pour 1 mJ.h.m^{-3}) pour un travailleur et
- de 9 mSv par WLM (ou 2,5 mSv pour 1 mJ.h.m^{-3}) pour le public (Marsh et al., 2010).

Les valeurs dérivées de l'approche épidémiologique étant cohérentes en ordre de grandeur avec celles dérivées de l'approche dosimétrique, la CIPR a choisi d'harmoniser sa démarche de détermination des coefficients de dose en employant l'approche dosimétrique pour l'inhalation du radon, comme pour les autres radionucléides (ICRP, 2010).

5 VARIABILITE ET INCERTITUDES ASSOCIEES AUX APPROCHES DOSIMETRIQUES ET EPIDEMIOLOGIQUES

Les doses délivrées par le radon et ses descendants dépendent de nombreux paramètres détaillés au chapitre 3. On distingue parmi les facteurs les plus influents ceux qui relèvent de la variabilité des individus ou des situations d'exposition, ceux qui relèvent des approximations du système de dosimétrie, et ceux qui relèvent des incertitudes liées au manque de connaissance dans certains domaines.

Le calcul d'une dose efficace peut donc varier considérablement d'une situation à une autre en fonction des paramètres retenus. La CIPR fournit de fait des coefficients de dose de référence, applicables à des situations standards de travail et pour des individus de référence. Elle considère que les coefficients donnés sont

suffisamment robustes pour s'appliquer dans la très grande majorité des situations. Cela étant, lorsque les conditions s'écartent trop des conditions de référence, l'approche définie par la CIPR laisse la possibilité d'ajuster les coefficients de dose en recourant à des valeurs de paramètres plus réalistes.

Quelques exemples donnés ci-après permettent d'illustrer la variabilité des situations rencontrées et les conséquences sur le calcul de dose.

Paramètres sujets à la variabilité des individus et des situations d'exposition

- Les paramètres d'exposition que sont le débit respiratoire, la fraction des descendants du radon attachés aux aérosols et la distribution en taille de ces aérosols influencent significativement le dépôt des descendants du radon dans le poumon, leur répartition entre les bronches et les alvéoles et la dose qui s'ensuit. Des calculs effectués avec le modèle respiratoire de la CIPR (1994) et passés en revue par Marsh et al. (2010) conduisent à des coefficients de dose entre 3 et 6 mSv par mJ.h.m⁻³ (10 à 20 mSv par WLM) environ suivant les valeurs choisies pour ces paramètres d'exposition.
- Des paramètres individuels tels que la fraction d'air inhalée par le nez, les vitesses du transport mécanique et de l'absorption des descendants du radon déposés dans le poumon, l'âge et le sexe de la personne exposée influencent le résultat du modèle dosimétrique.
- Le tabagisme conduit chez le fumeur à un ralentissement de l'épuration mécanique qui pourrait augmenter la proportion de descendants du radon inhalés parvenant à se désintégrer dans le poumon. Il pourrait aussi favoriser l'épaississement du mucus et éloigner ainsi les cellules cibles de la source de rayonnement. Ces deux effets du tabac susceptibles d'influencer la dosimétrie du radon dans des sens contraires restent difficiles à prendre en compte dans les modèles.

Paramètres définis par approximation dans les modèles dosimétriques

- Le facteur de pondération de 20 appliqué au rayonnement alpha dans le calcul de la dose efficace est la valeur nominale retenue à partir de données humaines et animales indiquant une efficacité biologique relative aux alentours de 10 à 20 suivant les effets étudiés et les protocoles des études. La valeur de ce facteur influe directement le coefficient de dose.
- Le facteur de pondération tissulaire de 0,12 appliqué au poumon dans le calcul de la dose efficace est une valeur nominale représentant le détriment radiologique relatif spécifique au poumon par rapport à l'ensemble des tissus du corps humain. Par simplicité, cette valeur est choisie égale aux facteurs de pondération de la moelle osseuse, du colon, de l'estomac et du sein. Cependant, dans la Publication 103 de la CIPR, la contribution du cancer du poumon au détriment total chez les adultes était proche de 29% (ICRP, 2007). Comme pour le facteur de pondération des rayonnements, la valeur de ce facteur influe directement sur le calcul du coefficient de dose.
- L'hétérogénéité des doses reçues n'est pas prise en compte de manière fine dans l'approche de la CIPR qui calcule une dose absorbée moyenne dans chaque région cible.

- D'autres modèles dosimétriques que celui de la CIPR sont disponibles, qui représentent différemment le système respiratoire et le dépôt des descendants du radon dans celui-ci. L'application de ces modèles à différentes situations d'exposition conduit à des coefficients de dose de l'ordre de 1,5 à 3 mSv par mJ.h.m⁻³ (6 à 12 mSv par WLM) (Marsh et al., 2010).

Paramètres générant des incertitudes dans le calcul de dose

- L'identification et la position des cellules cibles radiosensibles dans le poumon a une forte importance dans le calcul dosimétrique. Dans l'arbre bronchique, elles sont considérées être les cellules basales et sécrétrices, situées à quelques dizaines de microns de la surface de l'épithélium. Cette position est cependant connue avec des incertitudes. Faute d'information plus précise sur les sites d'origine de l'incidence spontanée des cancers pulmonaires, le risque stochastique est supposé réparti également entre les différents types de cellules cibles et entre les trois régions bronchique, bronchiolaire et alvéolaire du poumon. La dose équivalente au poumon est en conséquence la moyenne des doses équivalentes reçues par ces trois régions.

Limites et incertitudes relatives à l'approche épidémiologique

- L'ensemble des résultats épidémiologiques disponibles portent sur des personnes adultes, que ce soit pour les études de mineurs ou les études en population générale. De plus, la proportion de femmes dans ces études est limitée. Il y a donc un déficit de données pour les risques associés au radon pour les femmes et les enfants (ICRP, 2010).
- L'approche épidémiologique repose sur l'hypothèse que le seul risque avéré d'une exposition au radon est le cancer du poumon. Cette hypothèse est cohérente avec le fait que plus de 90% de la dose reçue suite à une exposition au radon (inhalation) est délivrée au poumon. Elle est également en accord avec l'état actuel des connaissances sur les effets du radon (ICRP, 2010).
- L'estimation du risque vie entière de décès par cancer du poumon associé à une exposition chronique au radon montre une très bonne cohérence entre les résultats des études épidémiologiques de mineurs d'uranium, et les résultats des études réalisées en population générale (ICRP, 2010). Néanmoins, des variations persistent entre études ou entre pays, en particulier en fonction des taux de base de mortalité par cancer du poumon (dépendants en particulier de la prévalence de fumeurs). Par ailleurs, des incertitudes importantes existent sur l'estimation de l'impact des facteurs modifiants la relation exposition-risque, tels que l'âge atteint quand le cancer survient ou le délai depuis l'exposition. L'ensemble de ces incertitudes et sources de variation peut conduire à une multiplication ou une division de l'estimation du risque vie entière attribuable au radon par un facteur de l'ordre de 2.
- Le risque vie entière de décès par cancer du poumon associé au radon estimé par la CIPR correspond à une population intégrant des fumeurs et des non-fumeurs (ICRP, 2010). Ce choix d'une population de référence, dite mondiale, est justifié par l'objectif de la CIPR de fournir des recommandations de

gestion de risque applicables à l'ensemble de la population. Néanmoins, ce choix ne rend pas compte de l'impact majeur du tabagisme sur le risque de cancer du poumon. Les estimations du risque de cancer du poumon attribuable au radon indiquent en effet qu'environ 75% de ces cancers concernent des fumeurs et 25% des non-fumeurs.

6 CONCLUSION

Les coefficients de dose pour l'exposition au radon et à ses descendants recommandés en 1993 par la CIPR (ICRP, 1993) dans sa Publication n° 65 étaient respectivement de 1,4 mSv par mJ.h.m⁻³ pour les travailleurs et 1,1 mSv par mJ.h.m⁻³ pour le public. Ces coefficients de dose reposaient sur une approche épidémiologique, jugée plus directe que l'approche fondée sur la démarche de la dosimétrie interne, et étaient près de trois fois plus faibles que les valeurs fournies par cette dernière. La différence obtenue entre les deux approches était alors expliquée par leurs incertitudes respectives et jugée acceptable au regard des incertitudes généralement admises en dosimétrie interne.

La Publication n° 115 de la CIPR (ICRP, 2010) a fourni une mise à jour du risque de cancer du poumon dû au radon fondée sur les données épidémiologiques récentes dérivées d'études de mineurs d'uranium et d'études en population générale. L'analyse de ces données a montré que le risque vie entière de décès par cancer du poumon chez les adultes ayant été exposés de façon chronique à de faibles concentrations de radon était environ 2 fois plus élevé que celui estimé sur la base des connaissances disponibles en 1993. Dans sa Publication n° 115, la CIPR a indiqué qu'elle comptait désormais, pour établir des coefficients de dose pour le radon, appliquer la même approche fondée sur la dosimétrie que celle utilisée pour tous les autres radionucléides, les résultats obtenus pour le radon selon cette approche étant cohérents avec ceux obtenus par l'épidémiologie.

Prenant en compte l'approche dosimétrique, la CIPR recommande dans sa Publication n° 137 (ICRP, 2017) d'utiliser un coefficient de dose de 3 mSv par mJ.h.m⁻³ pour les travailleurs dans les mines souterraines et les bâtiments dans la plupart des situations. Pour des situations spécifiques de travail intérieur impliquant une activité physique intense ainsi que pour les grottes touristiques, elle recommande un coefficient de dose de 6 mSv par mJ.h.m⁻³. La CIPR indique que le coefficient de dose de 3 mSv par mJ.h.m⁻³ s'applique également aux situations d'exposition du public dans l'habitat.

Les doses délivrées par le radon et ses descendants dépendent de nombreux paramètres, parmi lesquels ceux qui relèvent de la variabilité des individus ou des situations d'exposition, ceux qui relèvent des approximations du système de dosimétrie, et ceux qui relèvent des incertitudes liées au manque de connaissance dans certains domaines. Les situations retenues par la CIPR sont censées couvrir la grande majorité de lieux de travail les plus courants et être extrapolables à d'autres situations pour lesquelles les conditions ambiantes en termes d'empoussièrement, de ventilation ou d'hygrométrie seraient comparables (installations de captage des eaux, spas, etc..).

7 REFERENCES

- ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, Ann. ICRP 21 (1-3).
- ICRP, 1993. Protection against radon-222 at home and at work. ICRP Publication 65. Ann ICRP 23 (2).
- ICRP, 1994. Human respiratory tract model for radiological protection. ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24 (1-3).
- ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4) .
- ICRP, 2010. Lung cancer risk from radon and progeny, and statement on radon. ICRP Publication 115. Ann ICRP 40 (1).
- ICRP, 2014. Radiological Protection against Radon Exposure. ICRP Publication 126, Ann ICRP 43 (3).
- ICRP, 2017. Occupational intakes of radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137. Ann ICRP 46 (3-4).
- Marsh JW, Harrison J, Tirmarche M, Laurier D, Blanchardon E, Paquet F. Dose conversion factors for radon: recent developments. Health Phys 2010; 99: 511-6.
- Marsh JW, Laurier D, Tirmarche M. Radon dosimetry for workers: ICRP's approach. Radiat Prot Dosimetry 2017;177(4):466-74.