

IRSNINSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE*Faire avancer la sûreté nucléaire*

Référentiel d'aide à la gestion sanitaire de situations d'exposition à des concentrations élevées de radon

Rapport PRP-HOM/2016-00003

Pôle radioprotection, environnement, déchets
et crise

SOMMAIRE

1. CADRE ET OBJET DE L'EXPERTISE ADRESSEE A L'IRSN	3
2. RAPPELS SUR L'ORIGINE DU RADON	4
3. METHODE D'EVALUATION DU RISQUE DE CANCER DU POUMON ATTRIBUABLE AU RADON	4
3.1 DEMARCHE GENERALE	4
3.2 EFFET SANITAIRE ASSOCIE AU RADON	5
3.3 MODELE DE RELATION EXPOSITION-RISQUE	5
3.4 TAUX DE MORTALITE DU CANCER DU POUMON	6
3.5 SITUATIONS-TYPES D'EXPOSITION AU RADON	7
3.5.1 Sexe	7
3.5.2 Age au moment de l'exposition	7
3.5.3 Concentration de radon	8
3.5.4 Durée d'exposition	8
3.5.5 Exposition ancienne	9
3.5.6 Synthèse des situations-types	9
3.6 INDICATEURS DE RISQUE	10
3.6.1 Calcul des probabilités « vie entière »	10
3.6.2 Estimation des risques relatifs « vie entière »	10
4. RESULTATS	11
4.1 EVALUATION DU RISQUE DE CANCER DU POUMON ASSOCIE A UNE EXPOSITION AU RADON SUR LE LIEU DE TRAVAIL	11
4.2 EVALUATION DU RISQUE DE CANCER DU POUMON ASSOCIE A UNE EXPOSITION AU RADON DANS L'HABITAT	12
4.2.1 Exposition au radon actuelle	12
4.2.2 Exposition au radon ancienne	18

4.3 EFFET DU TABAC SUR L'EVALUATION DU RISQUE DE CANCER DU POUMON.....	20
5. UTILISATION DE L'ECHELLE DE RISQUE	23
6. CONCLUSION	23
7. REFERENCES.....	25
LISTE DES TABLEAUX ET GRAPHIQUES	27
ANNEXES	29

1. CADRE ET OBJET DE L'EXPERTISE ADRESSEE A L'IRSN

Dans le cadre de l'opération de recensement des lieux de réutilisation des stériles miniers d'uranium réalisée par AREVA à la demande de la Direction Générale de la Protection des Risques (DGPR), des campagnes de mesures ponctuelles de radon sont menées depuis 2014 dans des lieux de vie ou de travail situés à proximité de ces stériles. Des concentrations anormalement élevées de radon ont été mesurées dans certains de ces lieux justifiant l'intervention des pouvoirs publics pour la gestion de ces situations.

Ainsi, à Bessines-sur-Gartempe, sur le fondement des mesures réalisées par AREVA et par l'IRSN, une évaluation des risques sanitaires en fonction des niveaux d'exposition, des comportements et de l'âge des différentes personnes occupant ou ayant occupé cette maison, a été réalisée par l'IRSN [1-2]. A partir de cette évaluation, l'Institut National du Cancer (INCa), en réponse à la saisine du 16 avril 2014 [3], a proposé un protocole de suivi médical de ces personnes, en précisant toutefois que celui-ci ne pouvait être extrapolé pour d'autres situations présentant des concentrations de radon élevées.

La campagne de recensement menée par AREVA met en évidence de nouvelles situations à risque, nécessitant une appréciation des risques sanitaires par les ARS. C'est pourquoi, il est important de disposer d'un cadre de référence pour la gestion sanitaire de ces situations. Ce cadre de référence a vocation à s'appliquer indifféremment à des situations d'exposition au radon d'origine anthropique ou naturelle, dans des lieux de vie ou de travail.

Dans ce but, par le courrier du 26 octobre 2015 [4], le Directeur Général de la Santé a demandé conjointement à l'IRSN et l'INCa :

- d'établir, sur la base des connaissances actuelles, une échelle de risque de cancer du poumon en fonction des niveaux d'exposition de concentration de radon (en s'appuyant notamment sur les différents seuils de la littérature ou de la réglementation), des scénarii et durées d'exposition, de l'âge et éventuellement des comportements (tabagisme) des personnes susceptibles d'être exposées ;
- d'évaluer, à partir de cette échelle, dans quelle mesure les modalités de suivi médical et les seuils de risque relatif retenus dans l'avis élaboré par l'INCa en 2014 sont transposables au cas général. Sur la base de l'avis de la Haute Autorité de Santé à venir, de formuler des préconisations sur les modalités de détection d'un cancer pulmonaire devant être mises en œuvre chez les personnes exposées et sur les informations à leur transmettre notamment en matière de prévention.

Ce référentiel d'aide à la gestion a vocation à compléter le projet d'instruction interministérielle qui vise à préciser les modalités de gestion des situations de dépassements

des niveaux de radon d'origine anthropique concernant l'information, la communication, la réduction voire la suppression de l'exposition des personnes exposées.

L'objet du présent rapport est de présenter l'échelle de risque établie par l'IRSN pour répondre au premier point de la demande de la DGS.

2. RAPPELS SUR L'ORIGINE DU RADON

Le radon est un gaz radioactif issu de la désintégration de l'uranium et du radium présents naturellement dans le sol et les roches. En se désintégrant (période de 3,8 jours), il forme des descendants solides, eux-mêmes radioactifs.

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 becquerels¹ par mètre-cube (Bq.m⁻³) d'air. Dans des lieux confinés tels que les mines souterraines, les grottes, mais aussi les bâtiments en général et les habitats en particulier, il peut s'accumuler et atteindre des concentrations élevées atteignant parfois plusieurs milliers de Bq.m⁻³.

La population générale est ainsi naturellement exposée au radon, à des niveaux variables selon la géologie des territoires et les caractéristiques de l'habitat [5] (Annexe 1). Outre cette exposition naturelle, les activités minières ont engendré la production de matériaux relativement riches en radium pouvant constituer des sources additionnelles importantes de radon.

3. METHODE D'EVALUATION DU RISQUE DE CANCER DU POUMON ATTRIBUABLE AU RADON

3.1 DEMARCHE GENERALE

De façon générale, l'évaluation quantitative des risques sanitaires vise à estimer par calcul la probabilité supplémentaire d'effets sanitaires (excès de risque) attribuable à une exposition à un agent donné (ici le radon). Pour réaliser cette évaluation, quatre étapes sont exécutées :

- ① identifier les effets sanitaires potentiels de l'agent considéré ;
- ② disposer d'un modèle de relation dose-réponse applicable à l'agent considéré ;
- ③ connaître les taux de base (c'est-à-dire en l'absence d'exposition à l'agent considéré) et le « risque relatif vie entière » des pathologies en cause ;

¹ Unité de mesure de la radioactivité. Un becquerel (Bq) est égal à une désintégration par seconde.

- ④ quantifier l'exposition des individus à l'agent considéré.

Les différents éléments utilisés pour l'évaluation des risques associés au radon sont détaillés ci-après.

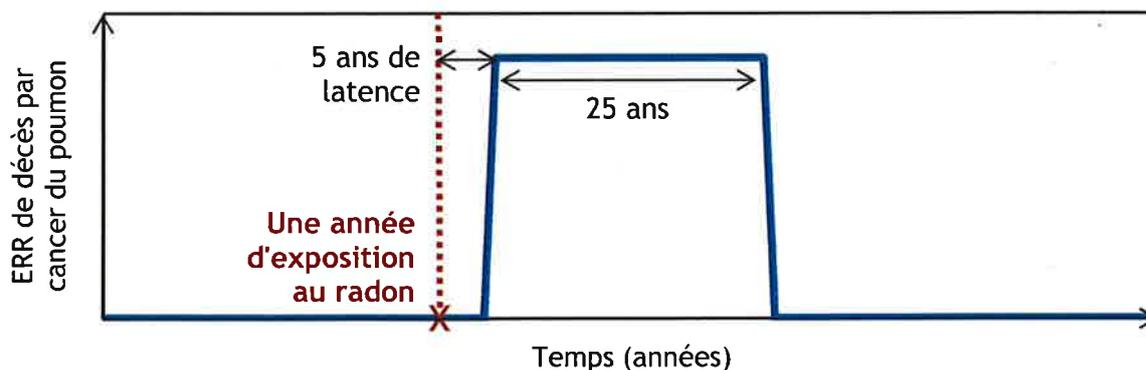
3.2 EFFET SANITAIRE ASSOCIE AU RADON

Le cancer du poumon est aujourd'hui le seul effet reconnu de l'exposition au radon. Les études épidémiologiques disponibles fournissent directement une quantification de la relation entre l'exposition au radon (en $\text{Bq.m}^{-3}.\text{h}$) et la probabilité de décès par cancer du poumon chez l'adulte. Les modèles dérivés des études de mineurs d'uranium et ceux dérivés des études concernant l'exposition du public dans l'habitat apparaissent aujourd'hui très cohérents [6]. L'estimation du risque de cancer du poumon peut ainsi se faire sur la base de l'estimation de l'exposition cumulée au radon, sans recourir au calcul de dose.

Le cancer du poumon étant aujourd'hui le seul effet reconnu de l'exposition au radon, l'évaluation des risques est focalisée sur le calcul de la probabilité de décès par cancer du poumon « vie entière » (c'est-à-dire jusqu'à l'âge de 75 ans) pour différents âges, durées et niveaux d'exposition.

3.3 MODELE DE RELATION EXPOSITION-RISQUE

Le modèle de risque utilisé est dérivé de l'étude européenne sur le risque de cancer du poumon associé au radon domestique [7]. L'excès de risque relatif (ERR) de cancer du poumon est de 0,16 pour une exposition à une concentration moyenne de 100 Bq.m^{-3} dans l'habitat pendant 25 années (7 000 heures/an, conventionnellement). Un délai de latence minimum de 5 ans entre l'exposition et la survenue éventuelle d'un cancer du poumon est appliqué (Graphique 1).



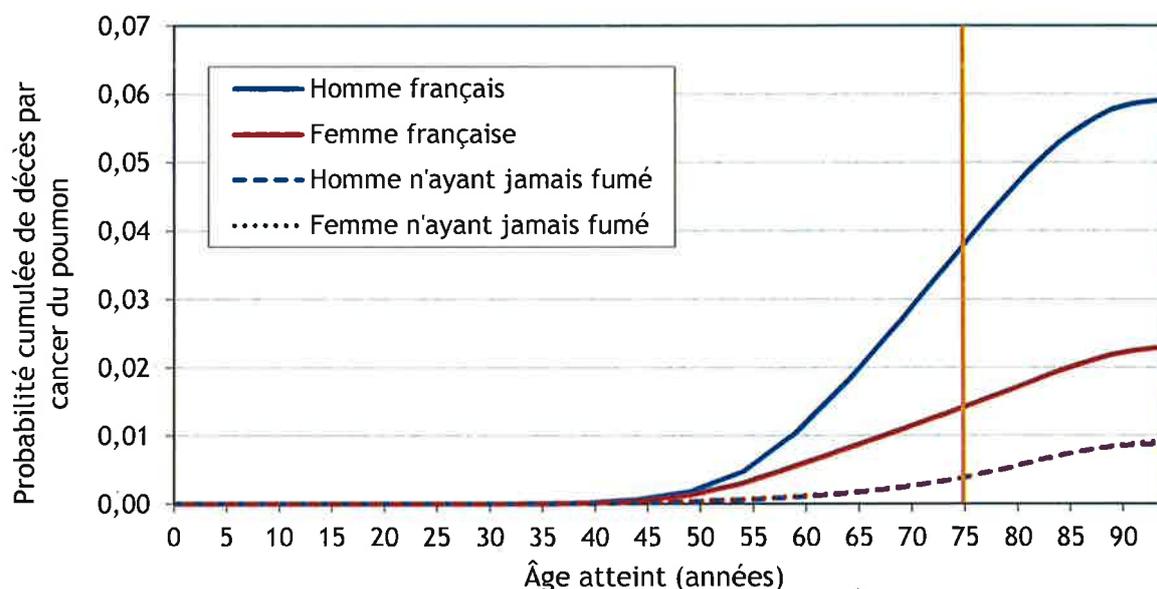
Graphique 1 : Présentation schématique de l'excès de risque relatif de décès par cancer du poumon pour une année d'exposition au radon dans l'habitat [7]

Sur la base des résultats des études réalisées chez les mineurs d'uranium, il est en outre considéré que l'ERR de cancer du poumon décroît avec le délai depuis la fin d'exposition [8]. Une étude a notamment montré une forte décroissance du risque 30 ans après la fin d'exposition [9]. Dans le présent rapport, il est considéré par simplification que l'association s'annule au-delà de 30 ans après la fin de l'exposition (25 ans + 5 ans de temps de latence).

En l'état des connaissances actuelles, aucune étude épidémiologique ne permet d'estimer le risque de cancer du poumon dû à une **exposition au radon durant l'enfance**. Cette lacune a été clairement identifiée par la CIPR [6]. Il y a peu d'éléments suggérant que, pour le radon, une exposition durant l'enfance entraînerait un risque supérieur à celui observé chez l'adulte [10]. Par ailleurs, il est vraisemblable que la décroissance du risque relatif après la fin de l'exposition observée chez les adultes s'applique aussi chez des enfants, mais elle n'est pas démontrée. En conséquence, un seul modèle de relation exposition-risque a été considéré dans le présent rapport, adapté à des situations d'exposition à l'âge adulte (Graphique 1).

3.4 TAUX DE MORTALITE DU CANCER DU POUMON

Le cancer du poumon est un cancer fréquent dans la population française. S'il est quasiment absent avant l'âge de 40 ans, sa fréquence augmente ensuite très rapidement pour atteindre un maximum vers 70 à 80 ans. Les taux de base de mortalité par cancer du poumon utilisés dans le présent rapport sont ceux constatés en 2012 dans les différentes tranches d'âge de la population française (comprenant des fumeurs et des non-fumeurs) [11]. En 2012, la probabilité de décès par cancer du poumon jusqu'à l'âge de 75 ans dans la population française est de l'ordre de 3,6 % chez l'homme et 1,4 % chez la femme (Graphique 2).



Graphique 2 : Probabilité cumulée de décès par cancer du poumon dans la population française et chez les personnes n'ayant jamais fumé

Le tabagisme est le principal facteur de risque de cancer pulmonaire. Pour s'affranchir de l'effet du tabac, l'évaluation s'est focalisée sur le risque de cancer du poumon chez des non-fumeurs. Les taux de mortalité par cancer du poumon d'individus n'ayant jamais fumé ont donc été considérés. Ces données n'existant pas par classe d'âge en France, les données issues de l'étude américaine « Cancer Prevention Study II » ont été utilisées [12]. Ainsi, la probabilité de décès par cancer du poumon jusqu'à l'âge de 75 ans pour une personne n'ayant jamais fumé est estimée à 0,36 % chez les hommes et 0,37 % chez les femmes.

3.5 SITUATIONS-TYPES D'EXPOSITION AU RADON

Afin d'établir une échelle de risque attribuable au radon, différents paramètres doivent être pris en compte :

- des paramètres individuels : le sexe, l'âge au moment de l'exposition ;
- des paramètres liés au radon : la concentration de radon, la durée d'exposition.

Par ailleurs, l'exposition au radon peut être « actuelle », c'est-à-dire que la personne réside ou travaille dans le bâtiment depuis un certain temps et ceci jusqu'à aujourd'hui (en pratique, le jour où la situation a été révélée). L'exposition peut aussi être « ancienne », pour des personnes ayant résidé ou travaillé dans le bâtiment et qui en sont parties depuis plusieurs années et ne sont donc plus exposées aujourd'hui.

Les choix faits pour ces différents paramètres sont présentés ci-après.

3.5.1 SEXE

Les taux de base de cancer du poumon étant très proches pour les hommes et les femmes n'ayant jamais fumé (Graphique 2), et le risque de cancer pulmonaire attribuable au radon étant identique pour les deux sexes, **il a été retenu de présenter les résultats moyennés pour les hommes et les femmes.**

3.5.2 AGE AU MOMENT DE L'EXPOSITION

Comme indiqué en section 3.3, on ne dispose pas actuellement de modèle de risque spécifique applicable à des expositions durant l'enfance. Néanmoins, par défaut, il a été retenu que le risque relatif attribuable au radon pour des expositions durant l'enfance peut être approché à partir des résultats présentés pour des expositions à l'âge de 20 ans.

Ainsi, deux situations d'exposition au radon à l'âge adulte ont été retenues :

- 20 ans au début de l'exposition ;
- 40 ans au début de l'exposition.

3.5.3 CONCENTRATION DE RADON

Quatre niveaux de concentration ont été retenus de manière à couvrir une large gamme de variation :

- 300 Bq.m⁻³, niveau de référence de la concentration de radon moyenne annuelle fixé par la directive 2013/59/Euratom ;
- 1 000 Bq.m⁻³, niveau d'action à partir duquel le propriétaire d'un établissement ouvert au public (situé en zone prioritaire) doit effectuer, sans délai, des actions simples destinées à réduire l'exposition des personnes au radon. Ces actions doivent être suivies d'un diagnostic du bâtiment avec, si besoin, des mesures complémentaires [13]. C'est aussi le niveau de concentration de radon, dans les lieux de travail, au-delà duquel un suivi dosimétrique individuel des travailleurs doit être mis en place par l'employeur [14] ;
- 2 500 Bq.m⁻³, « seuil d'alerte » impliquant des actions de gestion définies par le projet d'instruction interministérielle ;
- 10 000 Bq.m⁻³, niveau de concentration particulièrement élevé et rarement constaté en situation réelle.

3.5.4 DUREE D'EXPOSITION

La durée d'exposition dépend à la fois du nombre d'heures pendant lesquelles la personne est exposée en moyenne chaque jour et du nombre d'années d'exposition. Le nombre d'heures d'exposition par jour dépend de l'activité de l'individu : il peut varier fortement notamment selon qu'il s'agisse d'une personne exposée au travail ou d'un enfant en âge scolaire (environ 8 heures par jour), ou bien d'une personne du public exposée chez elle (de quelques heures par jour, jusqu'à 24 heures).

Un résident moyen séjourne, conventionnellement, 7 000 heures par an dans son habitation. Pour un salarié, la durée conventionnelle de travail est de 1 600 heures par an. S'il s'agit d'une exposition survenue dans le cadre scolaire, il peut être retenu 900 à 1 400 heures par an.

Les nombres d'années d'exposition retenus sont les suivants :

- 1 an, durée d'exposition pouvant être qualifiée de très courte ;
- 5 ans, durée d'exposition courte à moyenne ;
- 10 ans, durée d'exposition longue ;
- 20 ans, durée d'exposition très longue.

3.5.5 EXPOSITION ANCIENNE

Pour évaluer le risque concernant des anciens occupants, il a été retenu une période de 10 ans après la fin de leur exposition.

3.5.6 SYNTHÈSE DES SITUATIONS-TYPES

Le Tableau 1 récapitule les différentes situations-types prises en compte en fonction de l'âge de début d'exposition, de la durée d'exposition et de la concentration de radon : d'une part pour les personnes exposées dans l'habitat, et d'autre part pour celles exposées sur leur lieu de travail. Comme indiqué en section 3.5.2, le scénario des expositions durant l'enfance peut être approché à partir du scénario des expositions à l'âge de 20 ans.

Tableau 1 : Situations-types d'exposition au radon sur le lieu de travail et dans l'habitat

Âge de début d'exposition	Durée d'exposition	Âge de fin d'exposition	Concentration de radon (en Bq.m ⁻³)	Exposition cumulée au radon (en kBq.m ⁻³ .h)	
				Au travail ⁽¹⁾	Dans l'habitat ⁽²⁾
20 ans ⁽¹⁾ 40 ans ⁽²⁾	1 an	21 ans ⁽¹⁾ 41 ans ⁽²⁾	300	480	2 100
			1 000	1 600	7 000
			2 500	4 000	17 500
		10 000	16 000	70 000	
	5 ans	25 ans ⁽¹⁾ 45 ans ⁽²⁾	300	2 400	10 500
			1 000	8 000	35 000
			2 500	20 000	87 500
		10 000	80 000	350 000	
	10 ans	30 ans ⁽¹⁾ 50 ans ⁽²⁾	300	4 800	21 000
			1 000	16 000	70 000
			2 500	40 000	175 000
		10 000	160 000	700 000	
20 ans	40 ans ⁽¹⁾ 60 ans ⁽²⁾	300	9 600	42 000	
		1 000	32 000	140 000	
		2 500	80 000	350 000	
	10 000	320 000	1 400 000		

⁽¹⁾ Pour une durée de travail de 1 600 heures par an dans le bâtiment.

⁽²⁾ Pour un temps moyen de présence de 7 000 heures par an dans l'habitat.

3.6 INDICATEURS DE RISQUE

3.6.1 CALCUL DES PROBABILITES « VIE ENTIERE »

La probabilité cumulée « vie entière » (c'est-à-dire jusque l'âge de 75 ans) de décès par cancer du poumon de base, dans la population générale, est calculée à partir :

- du taux de mortalité par cancer du poumon ;
- de la probabilité de survie (calculée à partir des taux de décès toutes causes).

La probabilité « vie entière » de décès par cancer du poumon en présence d'exposition au radon est calculée à partir :

- du taux de mortalité par cancer du poumon ;
- de la probabilité de survie (calculée à partir des taux de décès toutes causes) ;
- de l'ERR de cancer du poumon, soit 0,16 pour une exposition à une concentration moyenne de radon de 100 Bq.m⁻³ dans l'habitat pendant 25 années (7 000 h/an) ;
- de l'âge à l'exposition ;
- et des caractéristiques d'exposition au radon, c'est-à-dire :
 - o de la concentration de radon ;
 - o de la durée d'exposition au radon (date de début et de fin).

Il a été considéré que les personnes exposées étaient indemnes de cancer du poumon à la fin de l'exposition. La probabilité « vie entière » a donc été calculée à partir de leur âge à la fin d'exposition, jusqu'à l'âge de 75 ans.

3.6.2 ESTIMATION DES RISQUES RELATIFS « VIE ENTIERE »

Le ratio de risque, également appelé « risque relatif vie entière » (RRVE), associé à l'exposition au radon est alors obtenu en divisant ces deux probabilités « vie entière » :

$$RRVE = \frac{\textit{probabilité vie entière de décès par cancer du poumon en présence de radon}}{\textit{probabilité vie entière de décès par cancer du poumon de base}}$$

Les RRVE ont ici été estimés jusque l'âge de 75 ans car les risques cumulés de cancer du poumon ont été calculés à cet âge dans la publication de Darby et al. [7]. Par ailleurs, dans le cadre de l'estimation nationale de l'incidence et de la mortalité par cancer en France entre 1980 et 2012 [11] et dans le cadre de l'affaire de Bessines-sur-Gartempe [1-2], les risques cumulés avaient également été calculés jusque l'âge de 75 ans.

4. RESULTATS

4.1 EVALUATION DU RISQUE DE CANCER DU POUMON ASSOCIE A UNE EXPOSITION AU RADON SUR LE LIEU DE TRAVAIL

Les résultats d'évaluation de risque de décès par cancer du poumon sont présentés dans le Tableau 2 et le Graphique 3 pour chaque situation-type selon la durée d'exposition, la concentration de radon et l'âge de début d'exposition au travail.

Tableau 2 : Risque relatif vie entière de décès par cancer du poumon pour une personne exposée sur son lieu de travail (n'ayant jamais fumé)

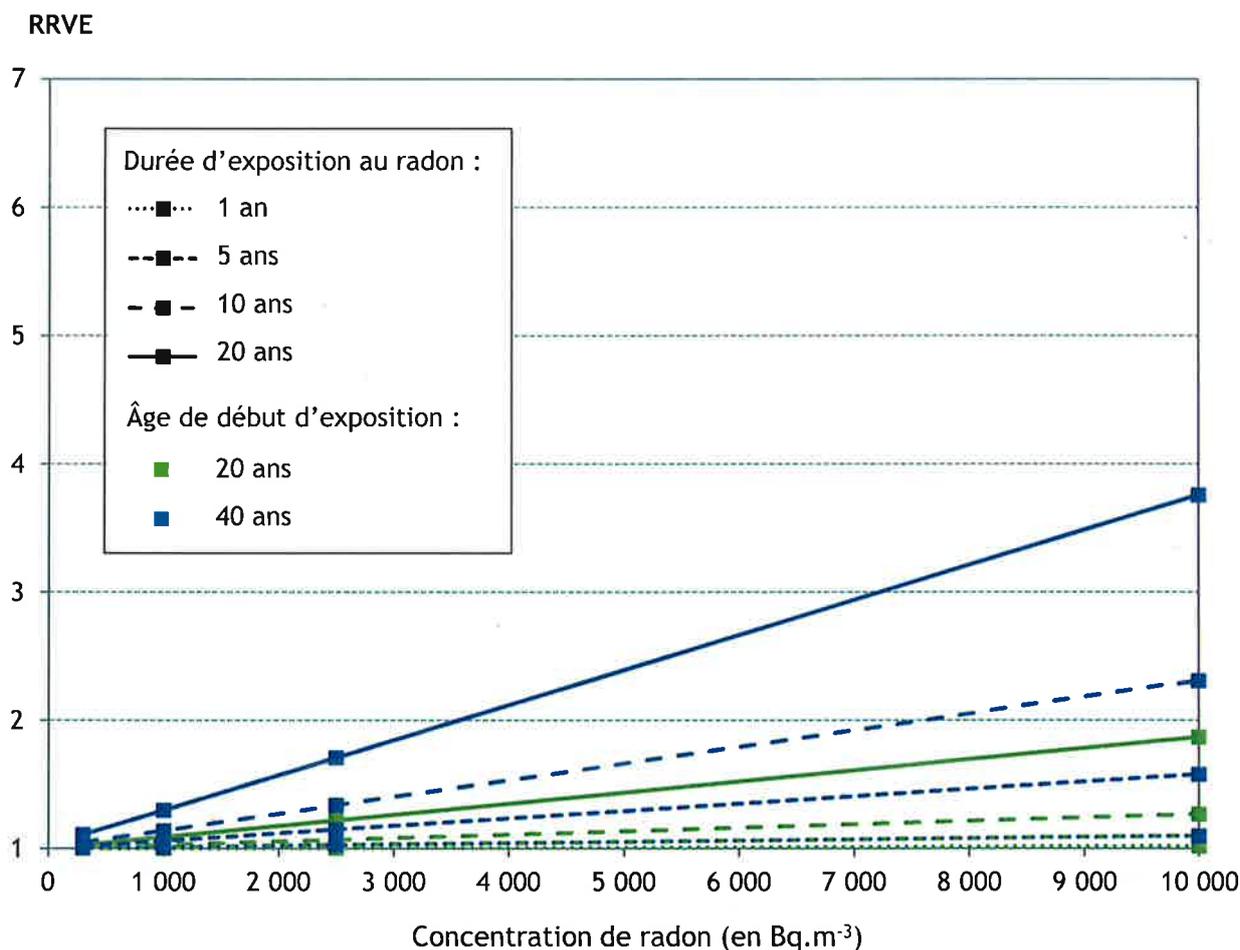
<i>Durée d'exposition *</i>	<i>Concentration de radon (en Bq.m⁻³)</i>	<i>RRVE selon l'âge de début d'exposition</i>	
		<i>20 ans</i>	<i>40 ans</i>
1 an	300	< 1,01	< 1,01
	1 000	< 1,01	1,01
	2 500	< 1,01	1,03
	10 000	1,02	1,10
5 ans	300	< 1,01	1,02
	1 000	1,01	1,06
	2 500	1,03	1,15
	10 000	1,10	1,58
10 ans	300	1,01	1,05
	1 000	1,03	1,14
	2 500	1,07	1,34
	10 000	1,27	2,31
20 ans	300	1,03	1,11
	1 000	1,09	1,30
	2 500	1,22	1,71
	10 000	1,87	3,76

* Pour une durée du travail de 1 600 heures par an dans le bâtiment.

Pour une personne exposée sur son lieu de travail, l'évolution du RRVE reste modérée pour des concentrations de radon inférieures à 2 500 Bq.m⁻³ et pour des durées d'exposition inférieures ou égales à 10 ans (risque inférieur à 1,3).

Lorsque le niveau de concentration de radon est très élevé (10 000 Bq.m⁻³) et que la durée d'exposition est très longue (20 ans), la probabilité vie entière augmente d'un facteur 2 pour une exposition à partir de l'âge de 20 ans.

Par contre, pour une exposition à partir de l'âge de 40 ans, la probabilité vie entière augmente d'un facteur 2 à 4, lorsque le niveau de concentration de radon est élevé (2 500 à 10 000 Bq.m⁻³) et que la durée d'exposition est longue (10 à 20 ans).



Graphique 3 : Risque relatif vie entière de décès par cancer du poumon selon la durée et l'âge de début d'exposition au radon sur le lieu de travail (personnes n'ayant jamais fumé)

4.2 EVALUATION DU RISQUE DE CANCER DU POUMON ASSOCIE A UNE EXPOSITION AU RADON DANS L'HABITAT

4.2.1 EXPOSITION AU RADON ACTUELLE

Les résultats d'évaluation de risque de décès par cancer du poumon sont présentés dans le Tableau 3 pour chaque situation-type selon la durée d'exposition, la concentration de radon et l'âge de début d'exposition dans l'habitat.

Les Graphiques 4 et 5 correspondent à la représentation graphique de ces résultats, respectivement en fonction du niveau de concentration de radon (en Bq.m³) et de l'exposition cumulée au radon (en kBq.m³.h, avec une exposition annuelle de 7 000 heures).

Tableau 3 : Risque relatif vie entière de décès par cancer du poumon pour une personne exposée au radon dans l'habitat (personnes n'ayant jamais fumé)

<i>Durée d'exposition *</i>	<i>Concentration de radon (en Bq.m⁻³)</i>	<i>RRVE selon l'âge de début d'exposition</i>	
		<i>20 ans</i>	<i>40 ans</i>
1 an	300	< 1,01	1,02
	1 000	1,01	1,05
	2 500	1,02	1,11
	10 000	1,07	1,42
5 ans	300	1,01	1,08
	1 000	1,04	1,26
	2 500	1,11	1,63
	10 000	1,45	3,51
10 ans	300	1,04	1,18
	1 000	1,12	1,58
	2 500	1,29	2,43
	10 000	2,17	6,63
20 ans	300	1,12	1,39
	1 000	1,38	2,22
	2 500	1,95	4,00
	10 000	4,75	12,71

* Pour un temps moyen de présence de 7 000 heures par an dans l'habitat.

Ces résultats sont supérieurs à ceux observés précédemment pour une exposition au radon sur le lieu de travail, la durée annuelle d'exposition étant nettement plus importante dans l'habitat. De ce fait, il a été retenu de présenter plus en détails les évaluations de risque de cancer pulmonaire associé à une exposition au radon dans l'habitat.

Les Tableaux 4 et 5 présentent les résultats du Tableau 3 de manière un peu différente et plus détaillée, en permutant les deux premières variables (concentration de radon et durée d'exposition). Chaque tableau correspond à un âge différent de début d'exposition au radon dans l'habitat.

Tableau 4 : Risque relatif vie entière de décès par cancer du poumon pour une exposition dans l'habitat ayant commencé à l'âge de 20 ans (personnes n'ayant jamais fumé)

Concentration de radon	Durée d'exposition	Individu âgé de 20 ans au début de l'exposition			
		Âge à la fin d'exposition *	Probabilité vie entière de base	Probabilité vie entière avec exposition	Risque relatif vie entière
300 Bq.m ⁻³	1 an	21 ans	0,36 %	0,36 %	1,002
	5 ans	25 ans	0,36 %	0,37 %	1,01
	10 ans	30 ans	0,36 %	0,37 %	1,04
	20 ans	40 ans	0,35 %	0,39 %	1,12
1 000 Bq.m ⁻³	1 an	21 ans	0,36 %	0,36 %	1,01
	5 ans	25 ans	0,36 %	0,38 %	1,04
	10 ans	30 ans	0,36 %	0,40 %	1,12
	20 ans	40 ans	0,35 %	0,48 %	1,38
2 500 Bq.m ⁻³	1 an	21 ans	0,36 %	0,37 %	1,02
	5 ans	25 ans	0,36 %	0,40 %	1,11
	10 ans	30 ans	0,36 %	0,47 %	1,29
	20 ans	40 ans	0,35 %	0,68 %	1,95
10 000 Bq.m ⁻³	1 an	21 ans	0,36 %	0,39 %	1,07
	5 ans	25 ans	0,36 %	0,52 %	1,45
	10 ans	30 ans	0,36 %	0,79 %	2,17
	20 ans	40 ans	0,35 %	1,66 %	4,75

* Âge actuel, c'est-à-dire que les calculs sont réalisés à partir de cet âge et jusque l'âge de 75 ans.

Pour une personne exposée à partir de l'âge de 20 ans (Tableau 4), l'évolution du RRVE reste modérée pour des concentrations de radon inférieures à 2 500 Bq.m⁻³ et pour des durées d'exposition inférieures à 10 ans (risque inférieur à 1,4).

Par contre, lorsque le niveau de concentration de radon est élevée (2 500 à 10 000 Bq.m⁻³) et que la durée d'exposition est longue (10 à 20 ans), la probabilité vie entière augmente d'un facteur 2 à 5.

Les décimales du RRVE sont indiquées à titre informatif pour montrer la faible évolution du risque avec la durée d'exposition, en particulier pour une concentration de 300 Bq.m⁻³.

Tableau 5 : Risque relatif vie entière de décès par cancer du poumon pour une exposition dans l'habitat ayant commencé à l'âge de 40 ans (personnes n'ayant jamais fumé)

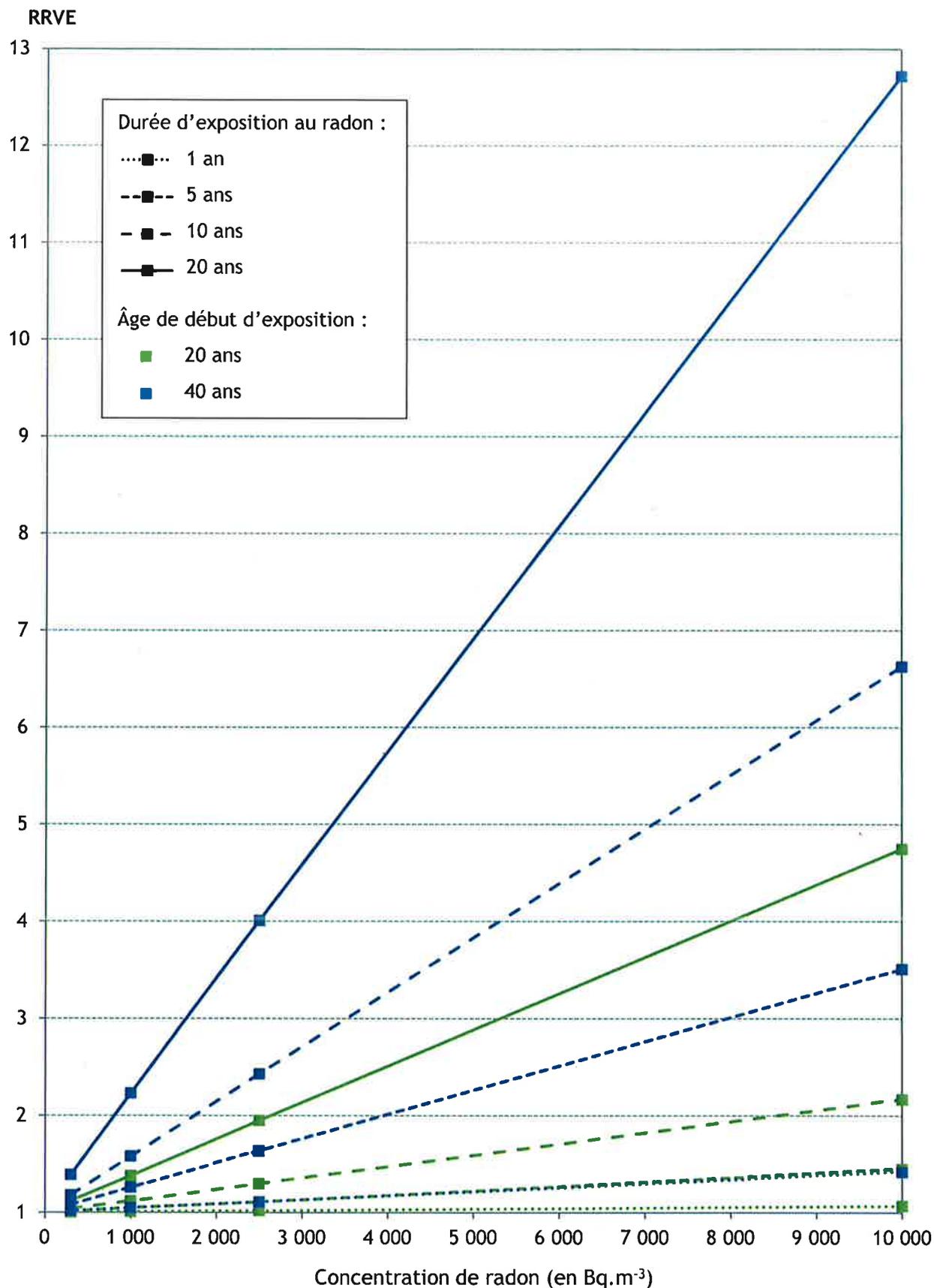
Concentration de radon	Durée d'exposition	Individu âgé de 40 ans au début de l'exposition			
		Âge à la fin d'exposition *	Probabilité vie entière de base	Probabilité vie entière avec exposition	Risque relatif vie entière
300 Bq.m ⁻³	1 an	41 ans	0,35 %	0,35 %	1,02
	5 ans	45 ans	0,33 %	0,36 %	1,08
	10 ans	50 ans	0,31 %	0,37 %	1,18
	20 ans	60 ans	0,24 %	0,33 %	1,39
1 000 Bq.m ⁻³	1 an	41 ans	0,35 %	0,36 %	1,05
	5 ans	45 ans	0,33 %	0,42 %	1,26
	10 ans	50 ans	0,31 %	0,49 %	1,58
	20 ans	60 ans	0,24 %	0,53 %	2,22
2 500 Bq.m ⁻³	1 an	41 ans	0,35 %	0,38 %	1,11
	5 ans	45 ans	0,33 %	0,55 %	1,63
	10 ans	50 ans	0,31 %	0,76 %	2,43
	20 ans	60 ans	0,24 %	0,95 %	4,00
10 000 Bq.m ⁻³	1 an	41 ans	0,35 %	0,49 %	1,42
	5 ans	45 ans	0,33 %	1,17 %	3,51
	10 ans	50 ans	0,31 %	2,08 %	6,63
	20 ans	60 ans	0,24 %	3,01 %	12,71

* Âge actuel, c'est-à-dire que les calculs sont réalisés à partir de cet âge et jusque l'âge de 75 ans.

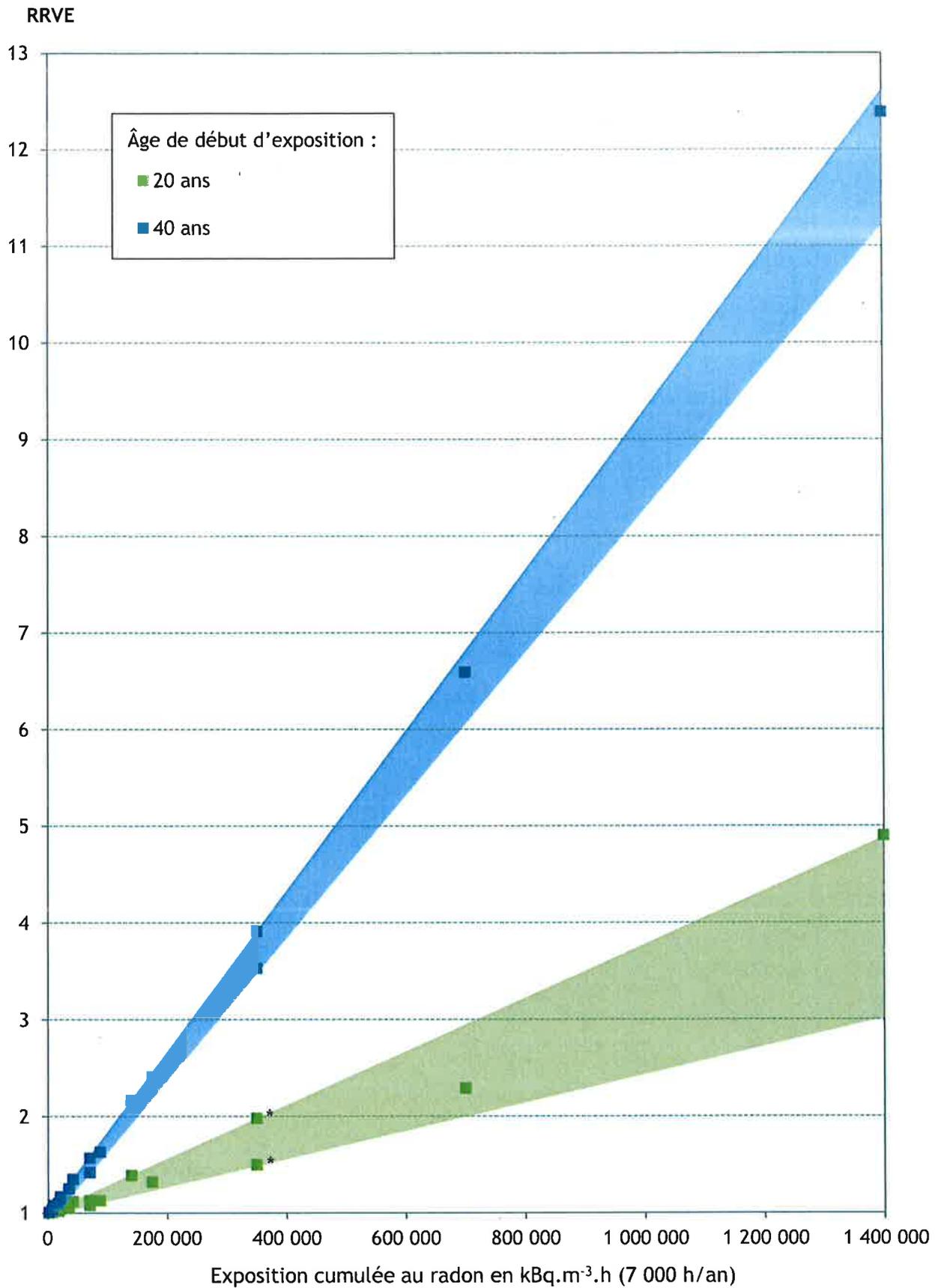
Pour les personnes exposées plus tardivement, en l'occurrence à partir de l'âge de 40 ans (Tableau 5), l'évolution du RRVE est plus marquée.

En-dessous de 2 500 Bq.m⁻³, le RRVE est inférieur ou proche de 2, excepté pour une très longue durée d'exposition où le risque estimé est de 4.

Lorsque le niveau de concentration de radon est très élevé (10 000 Bq.m⁻³) et que la durée d'exposition est longue (10 à 20 ans), la probabilité vie entière de décès par cancer du poumon augmente d'un facteur 6 à 13.



Graphique 4 : Risque relatif vie entière de décès par cancer du poumon selon la durée et l'âge de début d'exposition au radon dans l'habitat (personnes n'ayant jamais fumé)



Graphique 5 : Risque relatif vie entière de décès par cancer du poumon (personnes n'ayant jamais fumé) en fonction de l'exposition cumulée au radon dans l'habitat (en $\text{kBq.m}^3.\text{h}$)

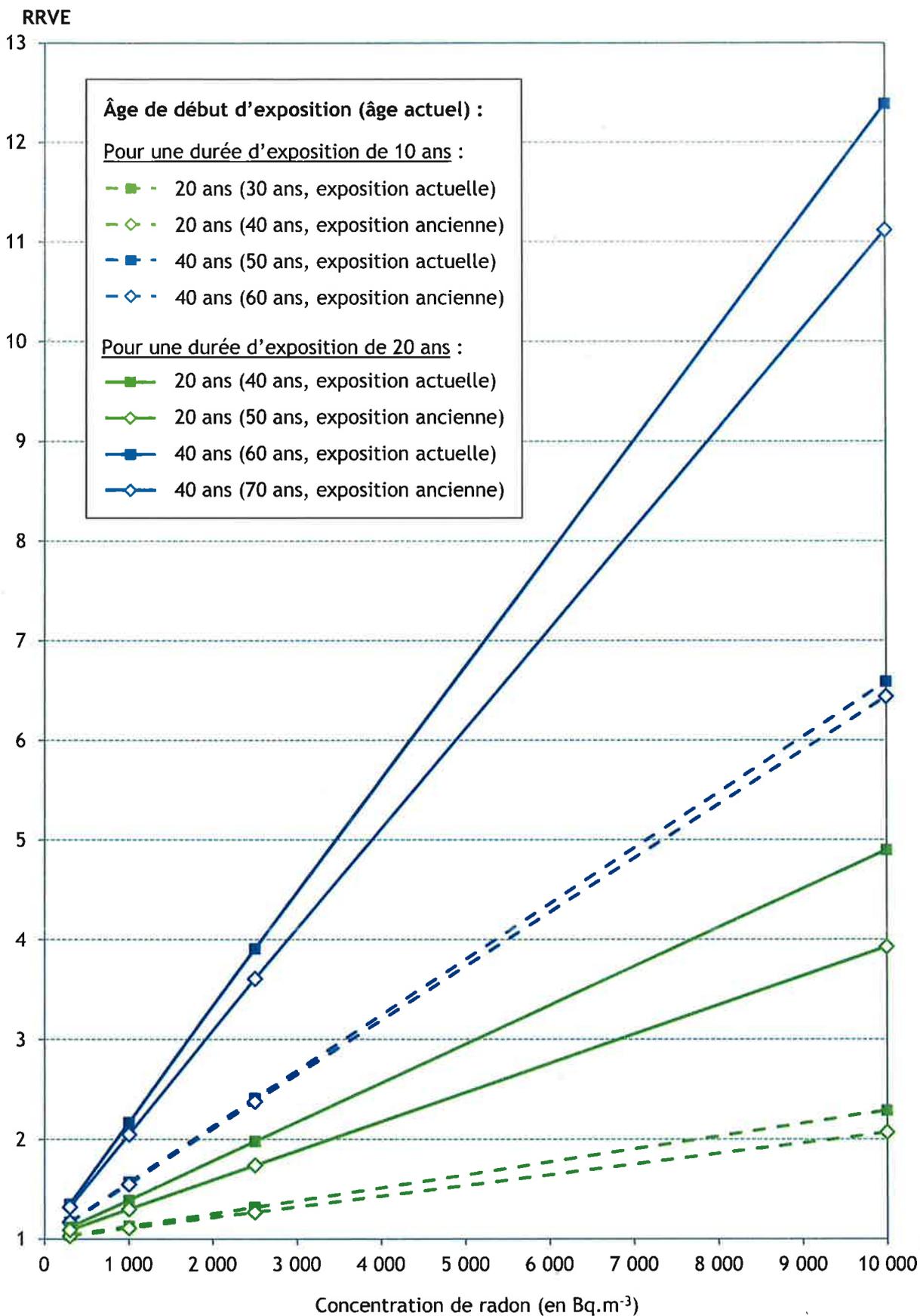
Le Graphique 5 représente la variation du RRVE en fonction de l'exposition cumulée au radon, d'une part pour une personne âgée de 20 ans en début d'exposition, d'autre part pour une personne âgée de 40 ans en début d'exposition. L'exposition cumulée étant le produit de la concentration par la durée d'exposition, à une valeur donnée d'exposition cumulée peut correspondre différents jeux de valeurs de ces 2 paramètres. Ainsi, on peut voir qu'une exposition au radon pendant 1 an à $10\ 000\ \text{Bq.m}^{-3}$ équivaut à une exposition pendant 10 ans à $1\ 000\ \text{Bq.m}^{-3}$, soit une exposition cumulée de $70\ 000\ \text{kBq.m}^{-3}.\text{h}$ pour un temps moyen de présence de 7 000 heures/an dans le bâtiment (Tableau 1). De la même manière, une exposition au radon pendant 5 ans à $10\ 000\ \text{Bq.m}^{-3}$ équivaut à une exposition pendant 20 ans à $2\ 500\ \text{Bq.m}^{-3}$, soit une exposition cumulée de $350\ 000\ \text{kBq.m}^{-3}.\text{h}$: les deux RRVE annotés d'un astérisque (*) dans le Graphique 5 correspondent à cette configuration pour une exposition au radon ayant commencé à l'âge de 20 ans. C'est pourquoi le RRVE calculé en fonction de l'exposition cumulée se présente sous la forme d'un cône.

Le Graphique 5 permet de mettre en évidence l'impact de l'âge, de l'exposition cumulée au radon, et de la durée de l'exposition (forme du cône). **L'exposition cumulée contribue au risque, mais deux expositions cumulées identiques n'entraînent pas forcément le même risque car l'âge de début et de fin d'exposition ont un rôle important.** Ainsi, le RRVE estimé pour une personne exposée à une concentration donnée de radon à partir de l'âge de 40 ans est plus élevé que celui estimé pour une personne exposée à même concentration à partir de l'âge de 20 ans. Cet effet est lié au modèle de relation utilisé où l'excès de risque relatif s'annule 30 ans après la fin de l'exposition (Graphique 1), ainsi qu'aux taux de mortalité par cancer du poumon en augmentation à partir de l'âge de 40 ans dans la population française (Graphique 2).

4.2.2 EXPOSITION AU RADON ANCIENNE

Il a été considéré ici que l'exposition au radon est ancienne, à savoir qu'elle a cessé 10 ans auparavant, et que les personnes concernées sont indemnes de cancer du poumon à l'heure actuelle, c'est-à-dire 10 ans après la fin de leur exposition au radon. Par conséquent, la probabilité vie entière a été calculée à partir de l'âge actuel de la personne (c'est-à-dire à partir de l'âge à la fin de l'exposition + 10 ans), jusqu'à l'âge de 75 ans.

Pour une exposition au radon ancienne, le RRVE de décès par cancer du poumon est plus faible que pour une exposition identique récente. Etant donné que les RRVE sont déjà relativement faibles pour une durée d'exposition récente de 1 an et 5 ans (Tableau 3 et Graphique 4), l'évaluation de risque pour une exposition ancienne a été réalisée uniquement pour les plus longues durées d'expositions (10 et 20 ans).



Graphique 6 : Risque relatif vie entière de décès par cancer du poumon (personnes n'ayant jamais fumé) pour une exposition au radon actuelle ou ancienne dans l'habitat

Le Graphique 6 représente les résultats d'évaluation de risque de décès par cancer du poumon pour une durée d'exposition dans l'habitat de 10 ans et de 20 ans, actuelle et ancienne. Lorsque l'exposition est ancienne (représentée par des losanges vides), le RRVE est plus faible que pour une exposition actuelle (représentée par des carrés pleins), mais l'écart est assez faible pour une durée d'exposition au radon de 10 ans (lignes en pointillés). Lorsque la durée d'exposition est de 20 ans (lignes continues), la différence de RRVE entre expositions anciennes et actuelles est plus marquée.

4.3 EFFET DU TABAC SUR L'ÉVALUATION DU RISQUE DE CANCER DU POUMON

Le tabac et le radon sont deux agents cancérigènes pulmonaires. Comme indiqué plus haut, leur action combinée entraîne un risque relatif qui se situe entre l'addition et la multiplication des deux risques relatifs.

Les calculs de risque présentés dans l'évaluation ci-dessus ont été réalisés pour des situations-types de personnes exposées au radon et supposées non-fumeurs, en prenant les taux de mortalité par cancer du poumon d'individus n'ayant jamais fumé comme taux de base (pour s'affranchir de l'effet du tabac).

Pour estimer le RRVE après exposition au radon chez un fumeur, il faut tenir compte du risque relatif associé au tabac. Le tabagisme est le principal facteur de risque du cancer du poumon avec un risque multiplié par un facteur de l'ordre de 10 entre un fumeur et un non-fumeur [15]. La probabilité de décès par cancer du poumon associée aux deux facteurs conjugués peut être approchée en utilisant la probabilité vie entière de décès par cancer du poumon chez un non-fumeur sans exposition additionnelle au radon, et les risques relatifs associés au radon d'une part et au tabac d'autre part.

Le Tableau 6 présente les résultats de probabilité vie entière de décès par cancer du poumon chez un fumeur régulier exposé au radon pendant 20 ans dans l'habitat à partir de l'âge de 20 ans.

Par exemple, pour la situation-type d'un homme ou d'une femme ayant été exposé(e) pendant 20 ans à une concentration de radon de $2\ 500\ \text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ à partir de l'âge de 20 ans, la probabilité vie entière de décès par cancer du poumon associée au radon est d'environ 0,7 % (Tableau 6). Considérant un risque relatif de 10 associé à un tabagisme régulier, la probabilité vie entière associée aux deux facteurs conjugués serait comprise entre 3,8 % (hypothèse d'une interaction additive) et 6,8 % (hypothèse d'une interaction multiplicative).

Tableau 6 : Probabilité vie entière de décès par cancer du poumon chez un fumeur régulier exposé au radon pendant 20 ans dans l'habitat à partir de l'âge de 20 ans

Concentration de radon	Probabilité vie entière		
	De base	Exposition au radon seul	Interaction radon-tabac *
300 Bq.m ⁻³		0,39 %	3,53 à 3,90 %
1 000 Bq.m ⁻³	0,35 %	0,48 %	3,62 à 4,82 %
2 500 Bq.m ⁻³		0,68 %	3,82 à 6,79 %
10 000 Bq.m ⁻³		1,66 %	4,80 à 16,6 %

* Interaction sub-multiplicative, c'est-à-dire se situant entre les effets additifs et multiplicatifs du radon et du tabac.

Cet effet combiné du radon et du tabac peut être illustré de la manière suivante. Considérons dans un premier temps 10 000 personnes de la population générale n'ayant jamais fumé (et exposée au radon à un niveau de base², Graphique 2). Parmi celles-ci, environ 35 personnes pourraient être atteintes d'un cancer du poumon au cours de leur vie (jusqu'à l'âge de 75 ans) (Tableau 6).

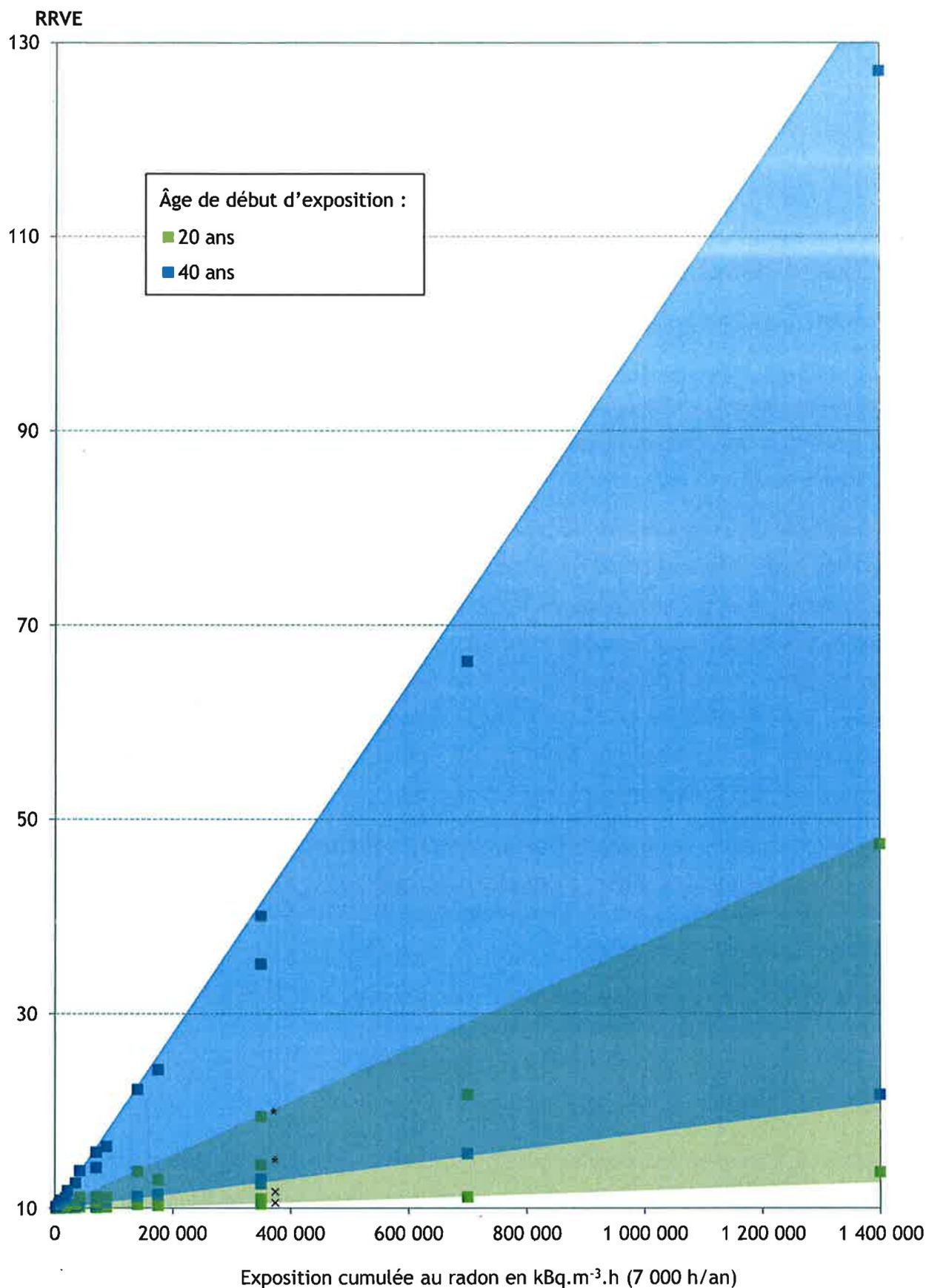
Supposons à présent que ces 10 000 personnes fument régulièrement au cours de leur vie ; alors, environ 350 d'entre elles pourraient un jour être atteintes d'un cancer du poumon.

Considérons cette fois que 10 000 personnes sont exposées à 2 500 Bq.m⁻³ pendant 20 ans à partir de l'âge de 20 ans et qu'elles n'ont jamais fumé ; environ 68 d'entre elles pourraient être atteintes d'un cancer du poumon au cours de leur vie.

Enfin, si ces 10 000 personnes exposées au radon fument de manière régulière au cours de leur vie, alors environ 380 à 680 d'entre elles pourraient un jour être atteintes d'un cancer du poumon.

Le Graphique 7 représente les résultats de l'évaluation de risque de décès par cancer du poumon en fonction de l'exposition cumulée au radon (en kBq.m⁻³.h, avec une exposition annuelle de 7 000 heures) à partir de l'âge de 20 ans et 40 ans. Il met en évidence l'étendue possible du risque combiné du radon et du tabac selon l'hypothèse additive (exemple des RRVE annotés d'une croix « × ») ou multiplicative (exemple des RRVE annotés d'un astérisque « * ») en fonction de l'âge et de l'exposition cumulée au radon : c'est-à-dire que l'interaction radon-tabac se situe dans cette zone représentée par les cônes (colorés en vert ou bleu).

² En France métropolitaine, la concentration moyenne de radon dans l'habitat est d'environ 60 Bq.m⁻³ (Annexe 1).



Graphique 7 : Risque relatif vie entière de décès par cancer du poumon chez des fumeurs réguliers, en fonction de l'exposition cumulée au radon dans l'habitat (en $\text{kBq.m}^{-3}.\text{h}$)

Il est important de souligner que ces calculs ne constituent qu'une approximation grossière, présentée ici pour illustrer l'importance du facteur tabac. Pour effectuer un calcul plus précis, il faudrait disposer de taux de mortalité par cancer du poumon pour différents niveaux de comportement tabagique et pour chaque classe d'âge (données non disponibles à ce jour en France), et intégrer ces taux dans le calcul du RRVE.

5. UTILISATION DE L'ECHELLE DE RISQUE

Les calculs présentés ici ont été effectués pour des situations-types d'exposition caractérisées notamment par l'âge de la personne en début d'exposition. Il a été considéré d'une part une personne exposée au radon à partir de l'âge de 20 ans pendant 1 an, 5 ans, 10 ans ou 20 ans, et d'autre part une personne exposée au radon à partir de l'âge de 40 ans pendant 1 an, 5 ans, 10 ans ou 20 ans.

Le Graphique 3, représentant la synthèse des résultats obtenus pour ces différentes situations-types d'exposition au radon sur le lieu de travail, peut être utilisé pour estimer - visuellement - le risque relatif vie entière (RRVE) d'un travailleur d'un autre âge exposé plus ou moins longtemps : pour faciliter la lecture, ce graphique a été décomposé en 4 graphiques selon la durée d'exposition (Graphiques 8 en Annexe 2). Supposons, par exemple, qu'une personne âgée aujourd'hui de 45 ans travaille depuis l'âge de 30 ans dans un bâtiment où la concentration de radon est de $3\,200\text{ Bq.m}^{-3}$; les Graphiques 3 et 8 montrent que cette personne a un RRVE estimé entre 1,2 et 1,6 environ.

De la même manière, les Graphiques 9 (Annexe 2), correspondant au Graphique 4 décomposé en 4 graphiques selon la durée d'exposition au radon dans l'habitat, peuvent être utilisés pour estimer - visuellement - le RRVE d'un résident d'un autre âge exposé plus ou moins longtemps. Prenons, par exemple, un habitant exposé depuis 8 ans à $5\,100\text{ Bq.m}^{-3}$ à partir de l'âge de 25 ans ; cette personne a un RRVE estimé entre 1,5 et 2 environ.

6. CONCLUSION

L'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire a établi, sur la base des connaissances actuelles, une échelle de risque de cancer du poumon en fonction des niveaux d'exposition de concentration de radon, des durées d'exposition, de l'âge et éventuellement du comportement tabagique des personnes susceptibles d'être exposées.

Une évaluation de risque associée à l'exposition au radon a été réalisée pour différentes situations d'exposition, selon la concentration de radon, la durée d'exposition et l'âge de

début d'exposition au radon. L'IRSN a évalué l'excès de risque de décès par cancer du poumon pour chacune des situations, en se fondant sur un coefficient de risque issu d'une étude épidémiologique européenne de référence [7] réalisée sur l'exposition au radon dans l'habitat, ainsi que sur les statistiques disponibles de mortalité par cancer du poumon dans la population générale. Les résultats ont été moyennés pour les hommes et les femmes étant donné qu'ils sont similaires pour les deux sexes.

Les résultats pour les non-fumeurs conduisent aux observations suivantes. Comme attendu, plus la durée d'exposition et la concentration de radon sont importantes, plus le risque relatif de décès par cancer pulmonaire est élevé. Pour une concentration inférieure à 300 Bq.m^{-3} , le RRVE de décès par cancer du poumon est faible ($\leq 1,4$) quels que soient l'âge de début d'exposition (≤ 40 ans) et la durée d'exposition (≤ 20 ans). Lorsque la concentration de radon dans l'habitat est de l'ordre de $1\ 000 \text{ Bq.m}^{-3}$, le RRVE est également faible ($\leq 1,4$), excepté pour une durée d'exposition d'au moins 10 ans à partir de l'âge de 40 ans où le RRVE est plus important (entre 1,5 et 2). Pour une exposition encore plus élevée ($2\ 500$ ou $10\ 000 \text{ Bq.m}^{-3}$), le RRVE est élevé (entre 2 et 13) pour des longues durées d'exposition à partir de l'âge de 20 ans ou plus. S'agissant d'une exposition sur le lieu de travail, le RRVE est faible ($\leq 1,3$), excepté pour des expositions à des concentrations d'au moins $2\ 500 \text{ Bq.m}^{-3}$ pendant 20 ans où le RRVE est plus important (entre 1,5 et 4).

A ce jour, aucune étude épidémiologique n'a permis d'estimer le risque de cancer du poumon dû à une exposition au radon durant l'enfance [6]. Dans le cadre de l'affaire de Bessines-sur-Gartempe [1-2], plusieurs hypothèses alternatives de modèle de risque appliquées à des expositions chez de jeunes enfants avaient amené à des estimations de risque très variables. En particulier, **l'hypothèse que la relation exposition-risque s'annule 30 ans après la fin de l'exposition a un impact très important**, puisque les taux de mortalité par cancer du poumon sont très faibles avant l'âge de 40 ans dans la population française. Aussi, dans le cadre du présent rapport, les calculs de risque n'ont été réalisés que pour des scénarios d'exposition à l'âge adulte. Pour les personnes exposées au radon pendant l'enfance, il est recommandé par défaut de considérer les résultats obtenus dans le cas d'une exposition ayant commencé à l'âge de 20 ans. S'il s'agit d'une exposition survenue dans le cadre scolaire (soit environ 900 à 1 400 heures par an), il est recommandé par défaut de considérer les résultats correspondant à une durée d'exposition annuelle des travailleurs, obtenus également dans le cas d'une exposition ayant commencé à l'âge de 20 ans. Par conséquent, le risque associé à une exposition au radon dans le cadre scolaire reste assez faible (RRVE $< 1,3$ environ), compte tenu des durées d'exposition relativement limitées dans le temps.

Tous ces calculs d'évaluation de risque reposent sur des taux de base de décès par cancer du poumon d'individus n'ayant pas fumé. Le tabac est le premier facteur de risque du cancer du poumon et le radon est considéré comme un facteur de risque indépendant. Considérant qu'un tabagisme régulier est associé à un risque relatif de cancer pulmonaire de l'ordre de 10, l'action combinée du radon et du tabac consisterait à augmenter le risque associé au radon d'un facteur 10 si les effets du radon et du tabac s'additionnent, voire plus de 10 s'ils se multiplient (interaction sub-multiplicative).

Il convient de rappeler que la démarche d'évaluation des risques repose sur des calculs faisant intervenir de nombreux paramètres. **Les résultats fournis sont donc associés à des incertitudes, inhérentes à cette démarche.** Par ailleurs, les études épidémiologiques visent à fournir une quantification du risque à l'échelle de population constituée d'individus dont la diversité des caractéristiques n'est pas entièrement décrite, soumis à des niveaux d'exposition variés. **Ceci implique que l'usage des modèles issus de ces études pour évaluer le risque d'un individu particulier est à prendre avec précaution.**

7. REFERENCES

- [1] Maison à Bessines-sur-Gartempe (87) construite sur des stériles et résidus de minerais. Estimation des teneurs en radon de l'air intérieur et risques sanitaires induits pour les occupants. Rapport d'expertise IRSN/PRP-HOM/2014-00005 rev1.
- [2] Cléro E, et al. Evaluation des risques sanitaires induits par le radon pour les occupants d'une maison construite sur des résidus de minerais d'uranium. Revue d'Epidémiologie et de Santé Publique (RESP). 2016; in press.
- [3] Saisine du 16 avril 2014 de la DGPR relative au protocole de suivi médical des personnes exposées à la radioactivité d'une maison d'habitation contaminée par les résidus de traitement d'uranium à Bessines (87).
- [4] Saisine du 26 octobre 2015 de la DGS relative à l'établissement d'un référentiel d'aide à la gestion sanitaire de situations d'exposition au radon.
- [5] Exposition de la population française aux rayonnements ionisants. Rapport IRSN/2015-00001.
- [6] Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon. Publication 115 de la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR), 2010.
- [7] Darby S, et al. Residential radon and lung cancer--detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14,208 persons without

lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe. Scand J Work Environ Health. 2006; 32 Suppl 1: 1-83.

- [8] National Research Council. Committee on Health Risks of Exposure to Radon. Board on Radiation Effects Research. Health effects of exposure to radon. BEIR VI report. Washington, D.C.: National Academy Press, 1999.
- [9] Vacquier B, et al. Radon-associated lung cancer risk among French uranium miners: modifying factors of the exposure-risk relationship. Radiat Environ Biophys. 2009; 48(1): 1-9.
- [10] UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). Sources, effects and risks of ionizing radiation - Report Volume II - Scientific annex B: Effects of radiation exposure of children. 2013.
- [11] Estimation nationale de l'incidence et de la mortalité des cancers en France entre 1980 et 2012. Rapport InVS, Francim, Inserm, Hôpitaux de Lyon, INCa, 2013.
- [12] Thun MJ, et al. Lung cancer death rates in lifelong nonsmokers. J Natl Cancer Inst. 2006; 98(10): 691-9.
- [13] Arrêté du 22 juillet 2004 relatif aux modalités de gestion du risque lié au radon dans les lieux ouverts au public. Journal officiel du 11 août 2004.
- [14] Décision n°2008-DC-0110 de l'Autorité de Sûreté Nucléaire du 26 septembre 2008 relative à la gestion du radon dans les lieux de travail.
- [15] International Agency for Research on Cancer (IARC). World Cancer Report. Lyon, France: IARC, 2008.

LISTE DES TABLEAUX ET GRAPHIQUES

➤ LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Situations-types d'exposition au radon sur le lieu de travail et dans l'habitat	9
Tableau 2 : Risque relatif vie entière de décès par cancer du poumon pour une personne exposée sur son lieu de travail (n'ayant jamais fumé).....	11
Tableau 3 : Risque relatif vie entière de décès par cancer du poumon pour une personne exposée au radon dans l'habitat (personnes n'ayant jamais fumé)	13
Tableau 4 : Risque relatif vie entière de décès par cancer du poumon pour une exposition dans l'habitat ayant commencé à l'âge de 20 ans (personnes n'ayant jamais fumé)	14
Tableau 5 : Risque relatif vie entière de décès par cancer du poumon pour une exposition dans l'habitat ayant commencé à l'âge de 40 ans (personnes n'ayant jamais fumé)	15
Tableau 6 : Probabilité vie entière de décès par cancer du poumon chez un fumeur régulier exposé au radon pendant 20 ans dans l'habitat à partir de l'âge de 20 ans	21

➤ LISTE DES GRAPHIQUES

Graphique 1 : Présentation schématique de l'excès de risque relatif de décès par cancer du poumon pour une année d'exposition au radon dans l'habitat [7]	5
Graphique 2 : Probabilité cumulée de décès par cancer du poumon dans la population française et chez les personnes n'ayant jamais fumé	6
Graphique 3 : Risque relatif vie entière de décès par cancer du poumon selon la durée et l'âge de début d'exposition au radon sur le lieu de travail (personnes n'ayant jamais fumé)	12
Graphique 4 : Risque relatif vie entière de décès par cancer du poumon selon la durée et l'âge de début d'exposition au radon dans l'habitat (personnes n'ayant jamais fumé)	16
Graphique 5 : Risque relatif vie entière de décès par cancer du poumon (personnes n'ayant jamais fumé) en fonction de l'exposition cumulée au radon dans l'habitat (en kBq.m ⁻³ .h) ...	17
Graphique 6 : Risque relatif vie entière de décès par cancer du poumon (personnes n'ayant jamais fumé) pour une exposition au radon actuelle ou ancienne dans l'habitat.....	19
Graphique 7 : Risque relatif vie entière de décès par cancer du poumon chez des fumeurs réguliers, en fonction de l'exposition cumulée au radon dans l'habitat (en kBq.m ⁻³ .h)	22

Graphiques 8 : Découpage du Graphique 3 selon la durée d'exposition au radon sur le lieu de travail	30
Graphiques 9 : Découpage du Graphique 4 selon la durée d'exposition au radon dans l'habitat	31

ANNEXES

➤ ANNEXE 1 : CONCENTRATION DE RADON EN FRANCE METROPOLITAINE

Concentrations de radon en France métropolitaine [5] :

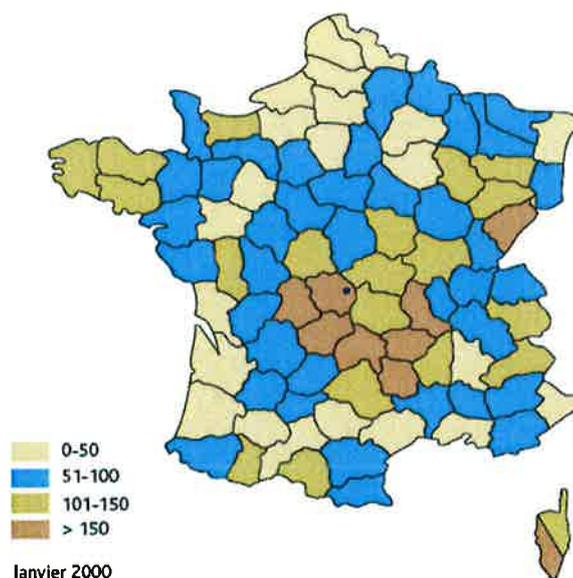
- Moyenne nationale : 60 Bq.m^{-3}
- Moyenne communale la plus faible : 13 Bq.m^{-3}
- Moyenne communale la plus élevée : 805 Bq.m^{-3}

Répartition des communes métropolitaines ayant une valeur moyenne :

- En-dessous de 100 Bq.m^{-3} : 73 %
- Entre 100 et 300 Bq.m^{-3} : 25 %
- Au-dessus de 300 Bq.m^{-3} : 2 %

Carte sur les concentrations de radon dans l'habitat en France métropolitaine :

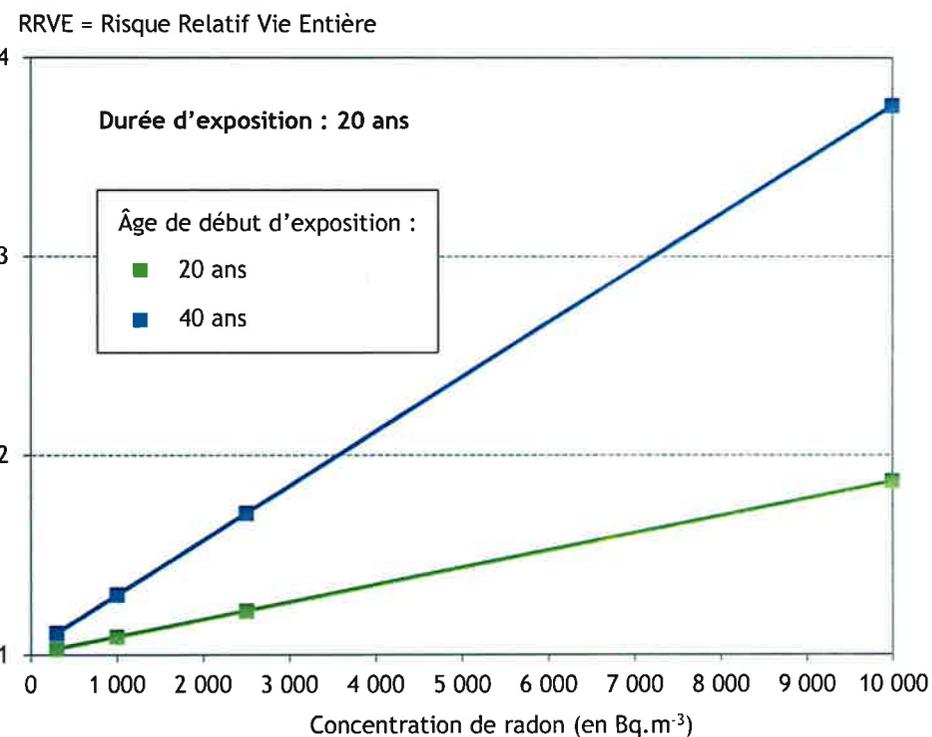
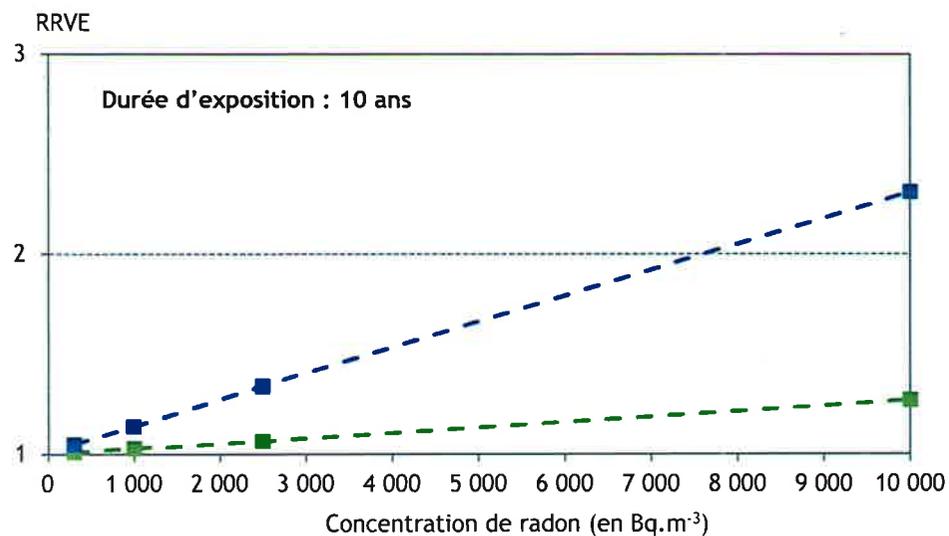
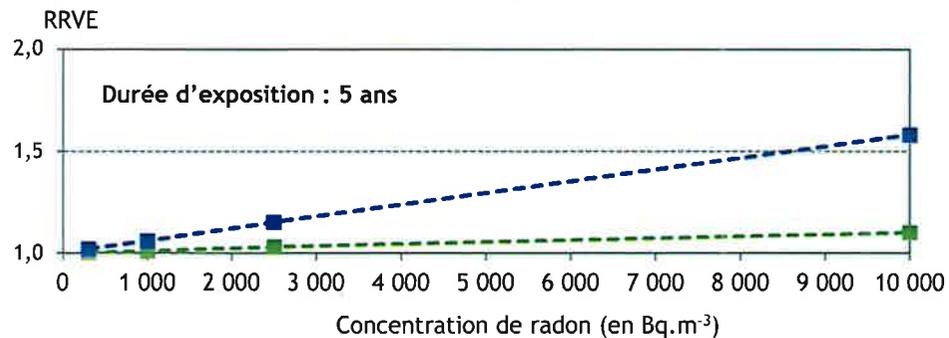
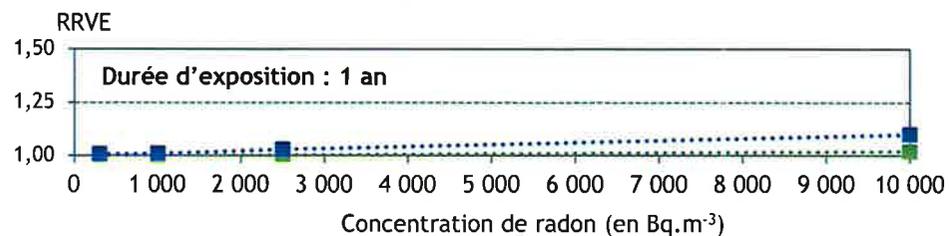
(<http://www.irsn.fr/FR/connaissances/Environnement/expertises-radioactivite-naturelle/radon/Pages/2-radon-habitations.aspx#.Vv52NUbiga4>)

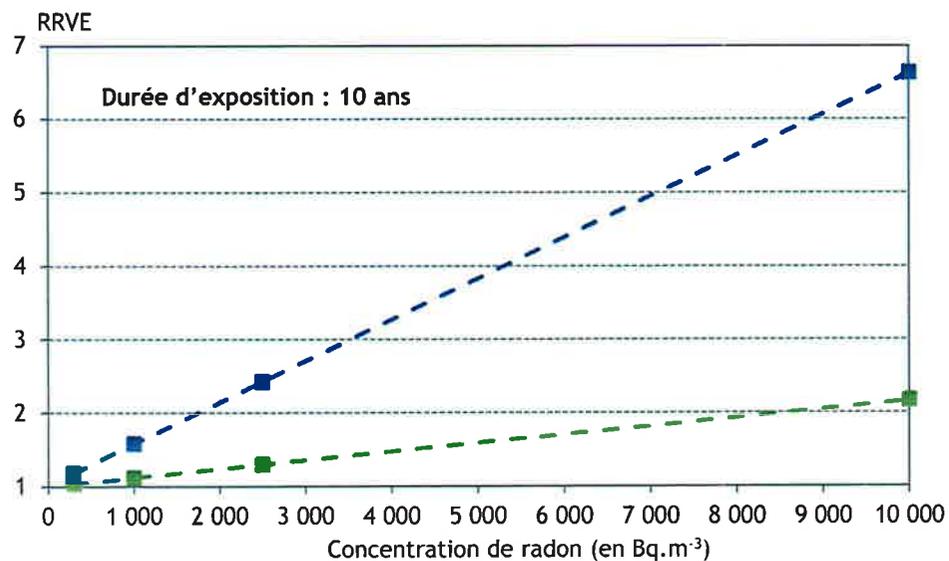
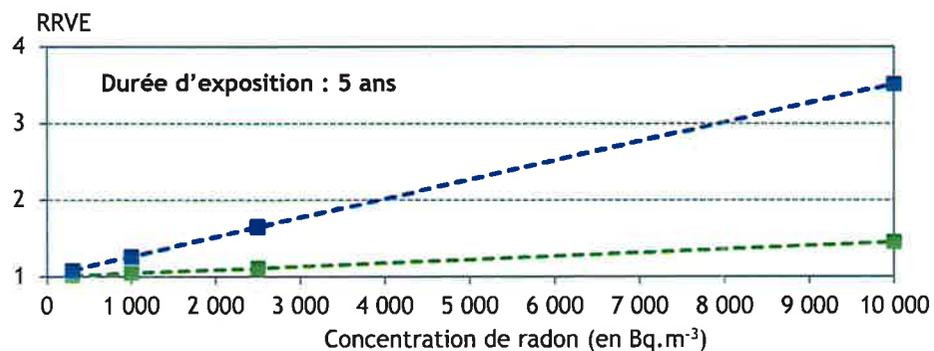
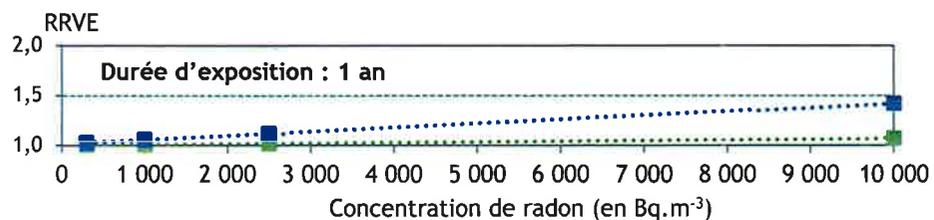


Moyenne par département des concentrations de radon dans l'air des habitations en Bq.m⁻³

➤ ANNEXE 2 : DECOUPAGE DES GRAPHIQUES 3 ET 4 POUR L'UTILISATION DE L'ECHELLE DE RISQUE

Graphiques 8 : Découpage du Graphique 3 selon la durée d'exposition au radon sur le lieu de travail





Graphiques 9 : Découpage du Graphique 4 selon la durée d'exposition au radon dans l'habitat

