

## Rapport d'expertise

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 PRP-HOM/2014-00005<sub>rev.1</sub>

Pôle radioprotection, environnement, déchets et  
crise

---

---

## RESUME

La Direction Générale de la Prévention des Risques du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de L'Energie a saisi l'Institut afin de disposer d'une évaluation des risques liés à la présence de stériles et résidus miniers dans les soubassements d'une maison située à Bessines-sur-Gartempe (87).

L'ensemble des voies possibles d'exposition des occupants de la maison a été examiné : l'exposition interne par inhalation du radon et de ses descendants, l'exposition externe au rayonnement gamma émis par le radium et ses descendants dans les sols et les soubassements, et enfin l'exposition interne par ingestion ou inhalation de radium. De l'ensemble des mesures effectuées, l'IRSN retient que l'inhalation de radon constitue la voie essentielle d'exposition pour les personnes ayant séjourné durablement dans la maison.

Le rapport présente les risques sanitaires connus en cas d'exposition au radon et l'évaluation, pour différents profils-types d'occupants de la maison, des niveaux d'exposition et des risques associés.

Ce rapport ne contient pas d'informations permettant l'identification individuelle des personnes ni de données couvertes par le secret médical.

---

---

## SOMMAIRE

<b>1 DEMANDE D'EXPERTISE ADRESSEE A L'IRSN .....</b>	<b>1</b>
<b>2 RAPPELS SUR L'ORIGINE DU RADON.....</b>	<b>2</b>
<b>3 MESURES DE CARACTERISATION DES DIFFERENTES VOIES D'EXPOSITION.....</b>	<b>2</b>
<b>4 PRINCIPAUX RESULTATS DES MESURES RADIOLOGIQUES ENVIRONNEMENTALES .....</b>	<b>4</b>
4.1 EXPOSITION AU RAYONNEMENT BETA/GAMMA ET AU RADIUM .....	4
4.2 ESTIMATION DES CONCENTRATIONS MOYENNES DE RADON DANS LA MAISON .....	5
4.2.1 Stratégie de mesures .....	5
4.2.2 Interprétation et choix des valeurs moyennes de concentration .....	6
4.3 CONCLUSION.....	9
<b>5 EVALUATION DES EXPOSITIONS ANNUELLES AU RADON.....</b>	<b>10</b>
<b>6 EVALUATION DES RISQUES.....</b>	<b>12</b>
6.1 ETAT DES CONNAISSANCES SUR LES EFFETS DU RADON SUR LA SANTE.....	12
6.1.1 Radon et risque de cancer du poumon .....	12
6.1.2 Autres effets sanitaires potentiels du radon .....	13
6.2 EVALUATION DU RISQUE PAR LA DOSE EFFICACE.....	14
6.3 METHODE D'EVALUATION DU RISQUE DE CANCER DU POUMON.....	15
6.4 RESULTATS DE L'EVALUATION DU RISQUE DE CANCER DU POUMON .....	17
6.5 EFFET DU TABAC SUR L'EVALUATION DU RISQUE DE CANCER DU POUMON.....	20
6.6 EVALUATION DU RISQUE DE LEUCEMIE .....	20
<b>7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS .....</b>	<b>21</b>

## **1 DEMANDE D'EXPERTISE ADRESSEE A L'IRSN**

Dans le cadre de la campagne de recherche de stériles miniers menée par AREVA, des mesures réalisées en mars 2014 par la société Algade ont révélé des concentrations anormalement élevées de radon dans l'air intérieur d'une habitation à Bessines-sur-Gartempe (87). La présence de sables cyclonés issus de traitement de minerais d'uranium, au-dessous d'une couche de terre végétale d'une épaisseur d'environ 50 cm, a aussi été mise en évidence sur la parcelle sur laquelle la maison est située.

L'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire a été chargé par les pouvoirs publics d'évaluer de manière la plus précise possible l'exposition radiologique et le risque sanitaire induit pour les différents occupants, habitants permanents et enfants gardés à domicile dans cette maison. Plusieurs équipes de l'IRSN (une dizaine de personnes, dont un médecin auprès de l'ARS<sup>1</sup> du Limousin), avec les moyens techniques nécessaires (un laboratoire mobile d'anthroporadiométrie, un véhicule laboratoire permettant la caractérisation de prélèvements sur le terrain et des équipements de mesure des rayonnements ionisants) ont ainsi été dépêchées sur place à partir du 24 mars pour :

- caractériser la situation radiologique autour de la maison et à l'intérieur de celle-ci afin d'acquérir les données nécessaires pour reconstituer au mieux l'exposition des occupants, notamment au radon ;
- recueillir auprès des occupants actuels, des informations sur leurs habitudes de vie (usage des différentes pièces, temps de séjour, habitudes en matière d'aération de la maison...)
- réaliser des mesures individuelles d'une possible contamination interne par du radium (anthroporadiométrie et analyse radiotoxicologique urinaire).

Compte tenu de la présence de radium dans les sables issus de traitement de minerais, les différentes voies possibles d'exposition ont été envisagées : l'exposition externe au rayonnement émis par le radium présent dans le sol, l'exposition interne par inhalation ou ingestion de radium et l'exposition interne par inhalation de radon.

Après la présentation des résultats de mesures effectuées sur le site pour caractériser ces différentes voies d'exposition, ce rapport d'expertise estime, pour quelques profils-types d'occupants, l'exposition due aux rayonnements ionisants et les risques sanitaires potentiellement induits.

Des évaluations de risque individuelles pourront être réalisées à la demande des personnes concernées, et uniquement à leur attention. Elles seront établies sur la base des informations, aussi précises que possible, que ces personnes seront en mesure de fournir pour reconstituer l'historique de leur présence dans la maison.

---

<sup>1</sup> Agence Régionale de Santé

## **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 becquerels<sup>2</sup> par mètre-cube (Bq.m<sup>-3</sup>). Dans des lieux confinés tels que les grottes, les mines souterraines mais aussi les bâtiments en général, et les habitations en particulier, il peut s'accumuler et atteindre des concentrations élevées atteignant parfois plusieurs milliers de Bq.m<sup>-3</sup>.

La population générale est ainsi naturellement exposée à des niveaux de radon variables selon la géologie des territoires<sup>3</sup> et les caractéristiques de l'habitat. Outre cette exposition naturelle, les activités minières ont engendré la production de matériaux relativement riches en radium et qui peuvent constituer des sources additionnelles importantes de radon. Ces matériaux sont de deux sortes :

- les stériles, roches excavées pour accéder au minerai d'uranium. Ils contiennent l'ensemble des radionucléides de la chaîne de l'uranium à l'équilibre radioactif avec l'uranium, à des teneurs plus faibles que celles des minerais ;
- les résidus, déchets résultant du traitement du minerai pour en extraire l'uranium. Ceux-ci présentent des teneurs en radium comparables à celles des minerais. Ils ont une granulométrie fine, suite aux opérations de broyage qu'ils ont subies, ce qui induit une émanation de radon plus élevée que celle des roches naturelles. L'uranium y est présent à des faibles teneurs et la chaîne de décroissance n'est plus à l'équilibre.

Les sables cyclonés situés sous la maison appartiennent à la catégorie des résidus.

## **3 MESURES DE CARACTERISATION DES DIFFERENTES VOIES D'EXPOSITION**

La présence des résidus sous la maison conduit à devoir caractériser les voies d'exposition possibles des occupants de la maison :

- l'exposition interne par inhalation du radon et ses descendants,
- l'exposition externe au rayonnement bêta/gamma émis par le radium et ses descendants,

<sup>2</sup> Unité de mesure de la radioactivité. Un becquerel (Bq) est égal à une désintégration par seconde

<sup>3</sup> Cartographie à l'échelle de la commune disponible sur [www.irsn.fr](http://www.irsn.fr)

- l'exposition interne par ingestion de radium suite à la consommation de produits cultivés dans le jardin, ou d'ingestion involontaire suite à la manipulation de ces sables (enfant jouant dans un bac à sable, par exemple),
- l'exposition interne par inhalation de radium suite à la remise en suspension de fractions fines de sables (cas de travaux d'aménagement du terrain par exemple).

Pour caractériser les voies d'exposition possibles des occupants, différents types de mesures ont été réalisés :

- exposition externe au rayonnement bêta/gamma :
  - des mesures de débit de dose (sonde 6150 ADb) en dehors de la parcelle pour estimer le bruit de fond naturel, ceci à 50 cm du sol (hauteur représentative de l'exposition d'un jeune enfant) ;
  - des mesures de débit de dose et de débit de photons dans le jardin et dans les pièces de la maison à 50 cm du sol et au contact de celui-ci (sonde 6150 ADb et SPP2) ;
- exposition interne par inhalation ou ingestion de radium :
  - des mesures de contamination surfacique du radium et de ses descendants, sous forme labile (non fixée, susceptible d'être remise en suspension). Il s'agit de prélèvements par frottis de 1 m<sup>2</sup>, suivis d'un comptage sur place à l'aide d'une échelle de comptage ;
- exposition interne par inhalation du radon :
  - un suivi temporel de la concentration atmosphérique de radon à l'aide de dispositifs de mesure en continu sur plusieurs jours (AlphaGUARD), ceci dans toutes les pièces de la maison ;
  - des mesures ponctuelles et en continu d'énergie alpha potentielle volumique<sup>4</sup> des descendants à vie courte du radon dans les principales pièces de vie (MEAP et Tracerlab BWLM-Plus) dans le but notamment de déterminer le facteur d'équilibre entre le radon et ses descendants ;
  - des mesures ponctuelles de la concentration de radon et du flux d'exhalation<sup>5</sup> en différents points de la maison.

Pour ce qui concerne la caractérisation de la voie d'exposition interne par inhalation de radon, les mesures ont été réalisées de manière à évaluer la distribution des niveaux de

<sup>4</sup> Ce terme désigne la grandeur de mesure représentative de l'activité volumique du mélange des descendants à vie courte du radon, qui sont présents dans l'air sans être nécessairement à l'équilibre radioactif avec ce dernier

<sup>5</sup> Activité de radon (Bq) qui émane du sol par unité de surface et par seconde

concentration de radon dans les différentes pièces de la maison et leur variation dans le temps afin d'estimer au mieux des valeurs moyennes d'exposition pour chacune des personnes y ayant séjourné. Il est à noter que la concentration de radon dans une habitation varie d'heure en heure au cours de la journée en fonction du mode de vie des occupants, des conditions météorologiques (temps sec ou humide, températures le jour et la nuit...) et, selon les saisons, en fonction des conditions climatiques. En principe, pour disposer d'une bonne connaissance de l'exposition chronique au radon dans une habitation, les mesures doivent être réalisées sur une période longue (plusieurs mois). Une estimation réalisée sur quelques jours, comme dans le cas présent, ne peut s'affranchir des incertitudes sur les paramètres précédemment cités qui influencent les niveaux de concentration moyenne susceptibles d'être observés dans le bâtiment sur de longues périodes. Toutefois, la stratégie de mesures adoptée (§ 4.2.1) par l'IRSN a visé à obtenir une représentation, à la fois enveloppe et aussi réaliste que possible, des concentrations moyennes de radon.

## **4 PRINCIPAUX RESULTATS DES MESURES RADIOLOGIQUES ENVIRONNEMENTALES**

### **4.1 EXPOSITION AU RAYONNEMENT BETA/GAMMA ET AU RADIUM**

Les mesures réalisées en dehors de la parcelle indiquent un bruit de fond de rayonnement naturel de 170 nanosieverts<sup>6</sup> par heure (nSv/h) à 50 cm du sol. S'agissant du jardin, la cartographie du débit de dose aux abords immédiats de la maison indique des valeurs comprises entre **trois et quatre fois le bruit de fond naturel**. La valeur maximale est relevée au nord-est du bâtiment (540 nSv/h à 50 cm du sol et 850 nSv/h au contact).

Sur le reste de la parcelle, les valeurs de débit de dose varient entre 170 nSv/h (bruit de fond naturel) et 600 nSv/h, hormis en un ou deux points où la mesure de débit de dose atteint la valeur maximale de 1 200 à 1 300 nSv/h. Compte-tenu de la localisation de ces points singuliers et de leur caractère ponctuel, ceux-ci ne sont pas susceptibles d'entraîner une exposition supplémentaire significative des occupants.

Il est par ailleurs noté que le jardin ne comporte pas de potager ni d'aire de jeu de type « bac à sable », ce qui rend peu probable un risque d'exposition interne par ingestion de produits contaminés par les sables.

Dans la maison, la cartographie des débits de dose indique des valeurs de l'ordre de **deux fois le bruit de fond**, soit 320 nSv/h à 50 cm, à l'exception de la cave qui présente une valeur significativement plus élevée, environ 1 000 nSv/h, qui, selon toute vraisemblance, est due en grande partie aux émissions bêta/gamma des descendants du radon.

---

<sup>6</sup> Le sievert (Sv) est une unité permettant d'évaluer l'impact des rayonnements ionisants sur l'homme. Un nanosievert est égal à un milliardième de sievert

Les analyses des échantillons obtenus par frottis n'ont pas révélé de contamination labile (poussière pouvant être ingérée ou inhalée) en radium, les résultats de ces mesures sont en dessous des seuils de détection.

## 4.2 ESTIMATION DES CONCENTRATIONS MOYENNES DE RADON DANS LA MAISON

### 4.2.1 STRATEGIE DE MESURES

La stratégie de mesures adoptée par l'IRSN a été, dans un premier temps, d'identifier l'origine du radon et ses voies de transfert dans le bâtiment. Dans un second temps, sur la base des informations recueillies auprès des propriétaires occupant les lieux, des mesures complémentaires ont été réalisées afin de simuler plus précisément leurs habitudes de vie (chauffage, ouverture et fermeture de portes et fenêtres, etc.) dans la perspective de reconstituer les valeurs d'exposition réalistes.

Ainsi, différentes séries de mesures en continu ont été réalisées du 24 au 28 mars 2014 qui ont permis successivement de caractériser :

- les sources de radon et l'influence de la structure du bâtiment sur le transport du radon dans l'habitation,
- l'influence sur la distribution du radon dans les différentes pièces des ouvrants, portes et fenêtres, selon les habitudes régulières des occupants,
- l'influence du chauffage de la maison sur une nuit et une journée entière.

Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 1, ci-dessous.

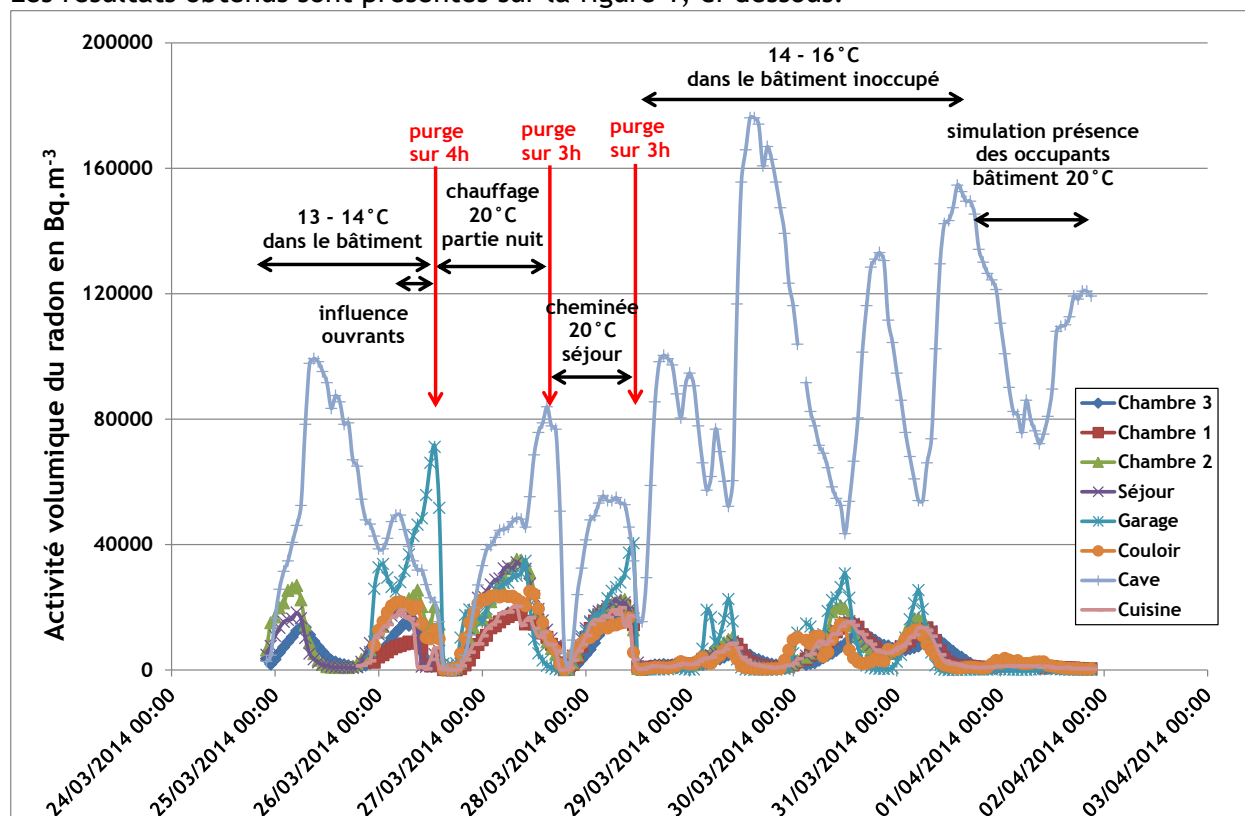


Figure 1 : Séquence de mesure de radon avec indications des conditions de vie



#### 4.2.2 INTERPRETATION ET CHOIX DES VALEURS MOYENNES DE CONCENTRATION

Les principaux enseignements qui peuvent être tirés des résultats obtenus durant cette campagne de mesures sont les suivants :

- la source principale de radon, très importante, se situe au niveau du garage (cf. plan de la maison en annexe). Il s'agit d'une ancienne galerie technique enterrée, située à l'extérieur de la maison et qui débouche directement dans la maison au niveau du garage. Cette galerie draine le radon produit par les sables ;
- cette source « régule » l'entrée du radon dans le bâtiment, vraisemblablement selon un cycle jour/nuit (en fonction de la variation des températures extérieures). Le bâtiment se charge en radon durant la nuit et se vidange durant la journée ;
- à ce mécanisme de régulation s'ajoute une influence notable de l'aération de la maison lors de l'ouverture des portes et fenêtres qui contribue en particulier à une baisse des concentrations dans les pièces de vie ;
- les concentrations de radon sont notablement plus élevées dans les pièces situées à proximité directe du garage (chambre 2 et séjour) que dans celles plus éloignées de ce dernier et qui donnent sur les façades (chambre 1, chambre 3 et cuisine) ;
- la cave située sous les chambres et la cuisine, présente des concentrations très élevées (de l'ordre de plusieurs dizaines à la centaine de milliers de Bq.m<sup>3</sup>). Son accès se fait uniquement par un escalier extérieur. Il n'a pas été mis en évidence de connexion directe entre la cave et les pièces à vivre. Le radon dans la cave provient en particulier d'une zone qui semble être en contact avec les sables. Le cycle de variation des concentrations paraît être caractéristique des variations de température et de pression entre le sol contenant les sables et l'atmosphère ;
- le chauffage de la maison a pour effet d'augmenter les concentrations maximales atteintes dans les différentes pièces ;
- il est difficile d'apprécier l'influence précise des conditions météorologiques sur la source de radon. Toutefois, à l'exception d'un épisode de pluie très intense, survenu dans la nuit du 24 au 25 mars, qui a sans doute bloqué temporairement l'entrée de radon dans la maison, les conditions humides qui ont prévalu durant la première partie de la semaine n'ont pas empêché des niveaux importants de radon d'être atteints dans les pièces à vivre. A l'inverse, lors de la deuxième semaine de mesure, il a été observé que les températures exceptionnellement élevées pour la saison et davantage représentatives d'une période estivale, ont conduit à une diminution très importante des concentrations de radon dans les pièces de vie ;

- le facteur d'équilibre radioactif entre le radon et ses descendants à vie courte, estimé sur la base des mesures d'énergie alpha-potentielle volumique (EAPV<sup>7</sup>) réalisées par l'IRSN, est proche de 0,4.

Compte tenu de cet ensemble d'enseignements, pour déterminer les concentrations moyennes nécessaires aux calculs d'exposition, l'IRSN a choisi de sélectionner deux séquences de mesures réalisées sur 24h, d'une part entre le 26 mars en début de soirée et le 27 mars, d'autre part entre le 31 mars en début de soirée et le 1<sup>er</sup> avril. Parmi les séries de mesures effectuées, la première séquence apparaît en effet représentative des conditions de vie susceptibles de prévaloir sur l'essentiel de l'année ; c'est-à-dire pendant environ 8 mois de mi-septembre à mi-mai (température de confort dans la maison de l'ordre de 19°C, température plus froide à l'extérieur, ouverture des portes et fenêtres selon les habitudes de vie des occupants). La seconde séquence apparaît représentative de mois d'été, avec des températures extérieures plus élevées et une aération plus importante de la maison. Cette séquence a été retenue pour le calcul des moyennes sur les quatre mois restants de l'année. Les résultats des mesures correspondant à ces séquences sont présentés dans les figures 2 et 3 ci-dessous.

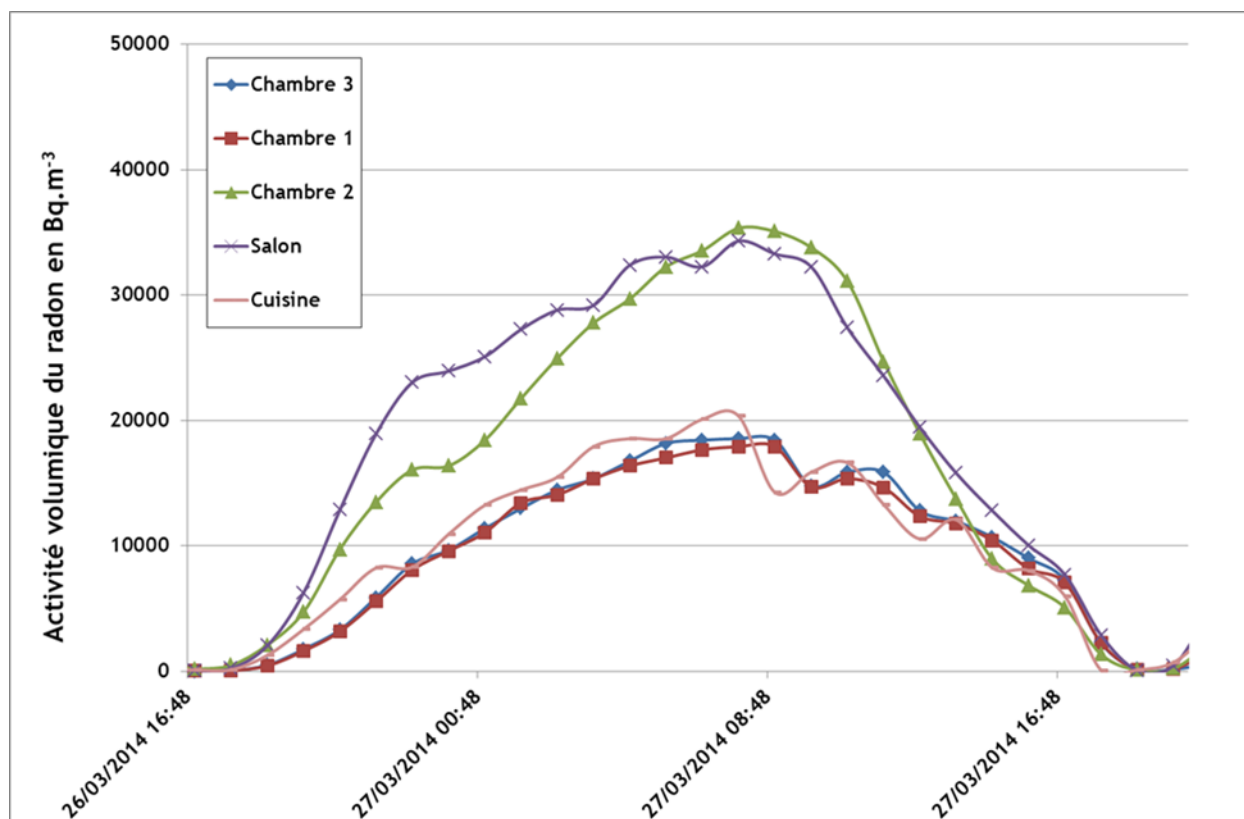


Figure 2 : Séquence de mesure de radon considérée représentative de la période couvrant l'hiver (8 mois)

<sup>7</sup> Ce terme désigne la grandeur de mesure représentative de l'activité volumique du mélange des descendants à vie courte du radon, qui sont présents dans l'air sans être nécessairement à l'équilibre radioactif avec ce dernier

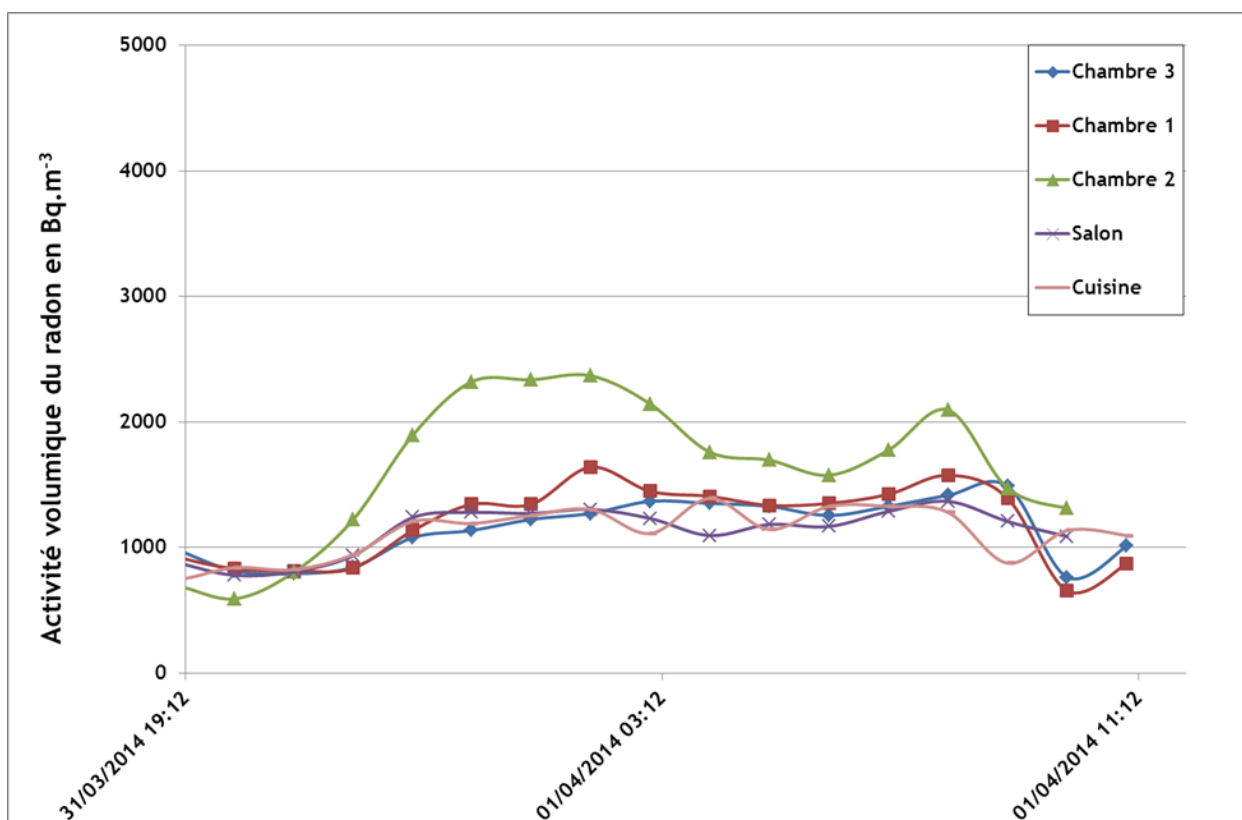


Figure 3 : Séquence de mesure de radon considérée représentative de la période couvrant l'été (4 mois)

Pour chacune de ces séquences, des moyennes « jour » et « nuit » ont été calculées en retenant les valeurs de concentration caractéristiques de ces deux périodes de la journée (Tableaux 1 et 2 ci-dessous). Pour le calcul des valeurs moyennes, les valeurs les plus basses enregistrées correspondant à l'effet de « purge » de la maison, réalisée entre chaque cycle de mesure, n'ont pas été retenues afin de ne pas sous-estimer la moyenne des concentrations de jour.

Tableau 1 : Concentrations moyennes de radon, respectivement en journée et au cours de la nuit, sur la période couvrant l'hiver (8 mois)

<i>Pièce de la maison</i>	<i>Concentration de radon le jour (Bq.m<sup>-3</sup>)</i>	<i>Concentration de radon la nuit (Bq.m<sup>-3</sup>)</i>
Chambre 1	13 000	13 000
Chambre 2	21 000	23 500
Chambre 3	13 500	13 500
Séjour	21 600	27 500
Cuisine	12 500	14 500

Tableau 2 : Concentrations moyennes de radon, respectivement en journée et au cours de la nuit, sur la période couvrant l'été (4 mois)

<i>Pièce de la maison</i>	<i>Concentration de radon le jour (Bq.m<sup>-3</sup>)</i>	<i>Concentration de radon la nuit (Bq.m<sup>-3</sup>)</i>
Chambre 1	900	1 200
Chambre 2	1 000	1 700
Chambre 3	900	1 150
Séjour	900	1 100
Cuisine	800	1 150

Les concentrations moyennes annuelles de radon obtenues par pondération des deux périodes considérées (hiver/été) sont présentées ci-dessous (Tableau 3).

Tableau 3 : Concentrations moyennes **annuelles** de radon, respectivement en journée et au cours de la nuit

<i>Pièce de la maison</i>	<i>Concentration de radon le jour (Bq.m<sup>-3</sup>)</i>	<i>Concentration de radon la nuit (Bq.m<sup>-3</sup>)</i>
Chambre 1	9 000	9 000
Chambre 2	14 300	16 000
Chambre 3	9 300	9 300
Séjour	14 700	18 700
Cuisine	8 500	10 000

Bien que présentant des niveaux plus élevés que dans les pièces de vie, la cave et le garage (> 50 000 Bq.m<sup>-3</sup>) ne contribuent que faiblement à l'exposition du fait du temps de séjour limité ; ces pièces n'ont en conséquence pas été prises en compte dans la suite des évaluations.

#### 4.3 CONCLUSION

A l'issue de l'ensemble des mesures réalisées pour caractériser les différentes voies d'exposition envisagées, l'IRSN retient que l'inhalation de radon constitue la voie essentielle d'exposition pour les personnes ayant séjourné dans la maison. Les valeurs de concentration moyenne de radon estimées pour les différentes pièces de cette maison sont de l'ordre de 40 à 90 fois plus élevées que la concentration moyenne dans l'habitat en Haute-Vienne (de l'ordre de 200 Bq.m<sup>-3</sup>). Pour comparaison également, on peut noter qu'environ 2% de l'habitat, dans ce département<sup>8</sup>, présente une concentration moyenne de radon supérieure à 1 000 Bq.m<sup>-3</sup>.

<sup>8</sup> Valeurs issues de la campagne de mesure de radon dans l'habitat en France (disponibles sur [www.irsn.fr](http://www.irsn.fr))

Il est à noter que les estimations réalisées correspondent à la configuration actuelle de la maison et qu'elles ne sont pas nécessairement extrapolables à la situation antérieure aux travaux qui ont pu être réalisés dans la maison.

Dans le chapitre qui suit, l'IRSN s'est attaché à évaluer l'exposition au radon des personnes.

## **5 EVALUATION DES EXPOSITIONS ANNUELLES AU RADON**

L'exposition cumulée au radon est définie ici comme le produit de la concentration moyenne retenue ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ) par le temps d'exposition (h).

Afin de pouvoir estimer le risque associé à l'inhalation de radon, il a été retenu de calculer l'exposition annuelle de différents profils d'occupants de la maison, en fonction de leur activité (personne au foyer, travailleur extérieur, écolier...) et de leur âge (enfant, adolescent, adulte), en tenant compte des temps respectifs passés dans les différentes pièces de la maison<sup>9</sup> et des niveaux moyens de concentration de radon dans l'air. Ces profils ont pour objectif d'être représentatifs des différents cas d'occupation rapportés à ce jour.

Les profils retenus sont :

- adulte de 50 ans, travaillant à domicile (22 heures/jour, 7 jours/semaine, 52 semaines/an),
- adulte de 50 ans, travaillant à l'extérieur (15,5 heures/jour, 7 jours/semaine, 52 semaines/an),
- jeune adulte de 20 ans, résident étudiant (18 heures/jour, 7 jours/semaine, 52 semaines/an),
- enfant de 7 ans, résident scolarisé (18 heures/jour, 7 jours/semaine, 52 semaines/an),
- nourrisson d'1 an, résident (19 heures/jour, 7 jours/semaine, 52 semaines/an),
- enfant de 7 ans, en garderie périscolaire (2 heures/jour, 5 jours/semaine, 40 semaines/an),
- enfant d'1 an, en nourrice (10 heures/jour, 5 jours/semaine, 40 semaines/an).

Pour chacune des situations types ci-dessus, les temps de séjour dans la maison retenus sont indiqués dans le tableau 4.

---

<sup>9</sup> Ces estimations s'appuient sur les valeurs de budget-temps du guide méthodologique « Gestion des sites potentiellement pollués par des substances radioactives », IRSN-ASN-MEDDE, 2011.

Tableau 4 : Temps de séjour (heures) dans les différentes pièces retenus pour chaque jour de présence dans la maison

	<i>Chambre 1 et 3</i> <i>(a)</i>	<i>Chambre 2</i>	<i>Autres pièces</i> <i>(séjour, cuisine)</i>
Adulte travaillant à domicile		8,5	13,5
Adulte travaillant à l'extérieur		8,5	7
Jeune adulte résident étudiant	14		4
Enfant résident scolarisé	14		4
Nourrisson résident	16		3
Enfant en garde périscolaire			2
Enfant en nourrice	4		6

(a) Les concentrations de radon dans les 2 chambres sont considérées identiques

Tenant compte des concentrations et des temps de séjour dans les différentes pièces retenus (respectivement tableaux 3 et 4), les expositions annuelles estimées pour les différentes situations types sont données dans le tableau 5.

Tableau 5 : Expositions annuelles pour les différents types d'occupation du logement

	<i>Temps de séjour annuel</i> <i>(heures)</i>	<i>Exposition cumulée</i> <i>(Bq.m<sup>-3</sup>.h)</i>
Adulte travaillant à domicile	8 030	1,1.10 <sup>8</sup>
Adulte travaillant à l'extérieur	5 660	7,9.10 <sup>7</sup>
Jeune adulte résident étudiant	6 570	6,4.10 <sup>7</sup>
Enfant résident scolarisé	6 570	6,4.10 <sup>7</sup>
Nourrisson résident	6 935	6,6.10 <sup>7</sup>
Enfant en garde périscolaire	400	5,9.10 <sup>6</sup>
Enfant en nourrice	2 000	2,5.10 <sup>7</sup>

A titre de comparaison, l'exposition cumulée sur un an par une personne, en considérant qu'elle passe 80% de son temps dans une habitation dont la concentration de radon est de 200 Bq.m<sup>-3</sup> (soit la concentration moyenne dans l'habitat en Haute-Vienne), est de 1,4.10<sup>6</sup> Bq.m<sup>-3</sup>.h.

## **6 EVALUATION DES RISQUES**

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. Pour réaliser cette évaluation, quatre étapes sont exécutées :

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

Ce chapitre 6 du rapport va s'attacher dans un premier temps à décrire les effets connus d'une exposition au radon puis ensuite à les quantifier.

### **6.1 ETAT DES CONNAISSANCES SUR LES EFFETS DU RADON SUR LA SANTE**

#### **6.1.1 RADON ET RISQUE DE CANCER DU POUMON**

De nombreuses études épidémiologiques chez les mineurs d'uranium et la population générale montrent que l'exposition cumulée au radon et à ses descendants entraîne un accroissement de la probabilité de survenue d'un cancer du poumon chez l'adulte<sup>10, 11</sup>. Cet effet est aléatoire ; si les résultats démontrent que la fréquence de cancer du poumon est plus élevée dans un groupe exposé que dans un groupe non exposé, les connaissances scientifiques disponibles à ce jour ne permettent pas de prédire quels individus vont développer un cancer, ni de déterminer lesquels de ces cancers sont attribuables au radon.

Des études épidémiologiques menées sur des mineurs d'uranium et en population générale (exposition au radon dans l'habitat), on peut retenir que :

- l'augmentation du risque de cancer du poumon chez l'adulte est proportionnelle à l'exposition cumulée, qui elle-même dépend de la concentration de radon à laquelle est exposé l'individu et du temps d'exposition. L'excès de risque relatif

---

<sup>10</sup> Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon. Publication 115 de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR, 2010)

<sup>11</sup> Effects of Ionising Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Vol 2, annexe II (Unsear, 2006)

de cancer du poumon associé à une augmentation de la concentration moyenne dans l'habitat de  $100 \text{ Bq.m}^{-3}$  est de l'ordre de  $0,16^{12,13}$  ;

- les effets du tabac et du radon sont sub-multiplicatifs<sup>14</sup> (c'est-à-dire que le risque relatif de l'action combinée du radon et du tabac se situe entre l'addition et la multiplication des risques relatifs des deux facteurs considérés séparément) ;
- l'excès de risque relatif de cancer du poumon décroît fortement en vingt à trente ans après la fin de l'exposition au radon.

Il n'y a pas aujourd'hui d'étude épidémiologique permettant d'estimer le risque de cancer du poumon dû à une exposition au radon durant l'enfance. Par ailleurs chez l'enfant, la décroissance du risque relatif après la fin de l'exposition, s'annulant au-delà de 30 ans, est vraisemblable mais n'est pas démontrée. Afin d'estimer le risque lié à l'exposition des enfants, il a été considéré que l'excès de risque de cancer du poumon en fonction de l'exposition était similaire pour les enfants à celui que les études épidémiologiques ont mis en évidence pour les adultes. Il n'y en effet aucun élément suggérant que, pour le radon, une exposition pendant l'enfance entraînerait un risque supérieur à celui observé chez l'adulte<sup>15</sup>. Toutefois, pour tenir compte des incertitudes, une estimation complémentaire postulant l'absence de décroissance du risque après la fin de l'exposition pour les enfants est également présentée.

### 6.1.2 AUTRES EFFETS SANITAIRES POTENTIELS DU RADON

Si le cancer du poumon est le seul effet associé à une exposition au radon scientifiquement établi, des études épidémiologiques chez des mineurs d'uranium ou chez des enfants ont cherché à mettre en évidence un possible risque de leucémie. Deux raisons ont conduit à mener ces études :

- la moelle osseuse est l'un des tissus les plus sensibles pour une exposition externe aux rayonnements ionisants. Il a en effet été démontré qu'une irradiation externe élevée est associée à une augmentation de la probabilité de survenue d'une leucémie, en particulier pour des expositions durant l'enfance ;
- l'inhalation du radon et de ses descendants conduit à une exposition interne : les radionucléides se distribuent dans le corps, principalement dans le poumon et accessoirement dans les autres organes où ils se désintègrent en irradiant les tissus. Les modèles dosimétriques montrent que plus de 90% de la dose reçue par

<sup>12</sup> Autrement dit, entre deux populations exposées pendant 25 ans à une différence de concentration de  $100 \text{ Bq.m}^{-3}$ , on observe une différence statistique de 16% de la probabilité de décès par cancer du poumon

<sup>13</sup> 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.

<sup>14</sup> Leuraud K, et al. Radon, smoking and lung cancer risk: Results of a joint analysis of three European case-control studies among uranium miners. *Radiat Res* 2011; 176: 375-87.

<sup>15</sup> Effects of radiation exposure of children. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR, 2013)



un individu exposé au radon est délivrée au poumon. Les doses aux autres organes sont beaucoup plus faibles que celles délivrées au poumon (de l'ordre de 100 fois inférieures). Néanmoins, une part de cette dose peut être délivrée à la moelle osseuse, qui est l'organe à risque pour la survenue de la leucémie<sup>16</sup>.

A ce jour, les études épidémiologiques réalisées n'ont pas démontré de lien entre l'exposition et le risque de leucémie. Si des études réalisées chez les mineurs d'uranium ont observé une augmentation du risque de leucémies, proportionnel à l'exposition professionnelle des mineurs, cette association n'a pas été retrouvée dans d'autres populations, et semble plutôt attribuable à l'exposition externe élevée des mineurs aux rayonnements gamma. Plusieurs études ont été mises en place pour vérifier l'hypothèse d'une association entre le risque de leucémie infantile (chez les moins de 15 ans) et l'exposition à la radioactivité naturelle. Certaines études ont conclu à une association (y compris en France<sup>17</sup>), mais du fait du faible niveau des doses à la moelle dues au radon, d'autres auteurs attribuent plutôt ces observations à l'exposition aux rayonnements externes d'origine tellurique<sup>18</sup>. Contrairement au cancer du poumon, aucun modèle de relation exposition-réponse n'est disponible à l'heure actuelle pour le radon et la leucémie.

Enfin, des cas de fibrose pulmonaire ont été relevés dans quelques études concernant des mineurs d'uranium, avec un risque de décès augmenté pour des individus ayant cumulé des expositions au radon très importantes. Cependant, il est important de rappeler que l'ambiance environnementale des mines d'uranium comporte, en plus du radon, une exposition externe au rayonnement gamma élevée ainsi que la présence de nombreux autres polluants (poussières, silice, vapeurs de diesel, résidus d'explosifs...). Ces observations de cas de fibrose pulmonaire sont rares et ne semblent pas extrapolables à une situation d'exposition dans l'habitat.

## 6.2 EVALUATION DU RISQUE PAR LA DOSE EFFICACE

La dose efficace<sup>19</sup> est un concept utilisé classiquement en radioprotection pour la gestion des risques associés à une exposition aux rayonnements ionisants. Pour tous types d'exposition aux rayonnements ionisants, l'excès de risque de cancers radioinduits jusqu'à l'âge de 90 ans pour une personne du public associée à une dose efficace d'un sievert a été estimé par la Commission Internationale de Protection Radiologique à 5,5%

---

<sup>16</sup> Kendall GM, Smith TJ. Doses from radon and its decay products to children. *J Radiol Prot.* 2005 Sep; 25(3):241-56.

<sup>17</sup> Evrard AS et al. Ecological association between indoor radon concentration and childhood leukaemia incidence in France, 1990-1998. *Eur J Cancer Prev* 2005;14:147-157.

<sup>18</sup> Kendall GM, et al. A record-based case-control study of natural background radiation and the incidence of childhood leukaemia and other cancers in Great Britain during 1980-2006. *Leukaemia.* 2013;27(1):3-9.

<sup>19</sup> La dose efficace est calculée pour représenter le risque à l'organisme entier, en tenant compte des doses délivrées à chacun des organes et de la radiosensibilité propre à chaque organe.

(4,1% s'il s'agit d'un travailleur)<sup>20</sup>, en s'appuyant principalement sur l'utilisation de modèles de relation dose-réponse dérivés du suivi sanitaire de la population des survivants des bombardements de Hiroshima et Nagasaki. La dose efficace est adaptée à la gestion préventive des risques dans la plupart des situations d'exposition aux rayonnements ionisants ; elle permet par construction de fournir une approche homogène, sur la base de modèles mathématiques reflétant le consensus international d'experts en radioprotection. Cependant cette homogénéité est obtenue en retenant une approche systématiquement majorante compte tenu des incertitudes parfois élevées sur la nature précise des mécanismes radiobiologiques en jeu, ce qui est au demeurant raisonnable s'agissant de calculs réalisés dans une perspective de prévention des risques. Enfin, il convient de noter que la dose efficace est un indicateur du risque à l'organisme entier, peu adapté dans le cas d'une exposition au radon, à laquelle est associé essentiellement un risque de cancer du poumon.

Il résulte de ce qui précède que la dose efficace n'est pas un indicateur représentatif pour quantifier de manière réaliste les risques liés à une exposition effective importante au radon de personnes dont il convient de prendre en compte également les caractéristiques particulières (âge à l'exposition, sexe, co-expositions, ...). L'approche épidémiologique, plus pertinente, a donc été privilégiée pour évaluer le risque pour les personnes exposées. En effet, comme expliqué plus haut, les études épidémiologiques disponibles sur l'exposition au radon dans l'habitat fournissent directement une quantification de la relation entre l'exposition au radon (en Bq.m<sup>-3</sup>.h) et la probabilité de survenue d'un cancer du poumon chez l'adulte.

L'IRSN a cependant calculé à titre d'information, sur la base des coefficients de dose actuellement en vigueur, les doses efficaces annuelles résultant de l'exposition au radon pour les différents profils d'occupants de la maison de Bessines. Ces doses sont de l'ordre de 150 à 300 mSv pour un résident, et de 15 et 60 mSv pour les situations de garderie (garderie périscolaire et nourrice, respectivement). L'IRSN attire l'attention sur le fait qu'il n'est pas possible de comparer de telles doses à celles qui sont retenues par les normes réglementaires de radioprotection, pour en tirer une quelconque appréciation en matière de risque pour les personnes concernées.

### 6.3 METHODE D'EVALUATION DU RISQUE DE CANCER DU POUMON

Dans le cas du radon, les études épidémiologiques disponibles fournissent directement une quantification de la relation entre l'exposition au radon (en Bq.m<sup>-3</sup>.h) et la probabilité de survenue d'un cancer du poumon chez l'adulte. Les modèles dérivés des études de mineurs et ceux dérivés des études concernant l'exposition du public dans

---

<sup>20</sup> The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Publication n° 103 (CIPR, 2007). La différence d'excès de risque de cancers radioinduits entre une personne du public et un travailleur pour une dose efficace de 1 Sv s'explique par la période différente sur laquelle l'exposition peut avoir lieu, 0 à 85 ans et 18 à 85 ans respectivement, pour une même espérance de vie (90 ans).

l'habitat apparaissent aujourd'hui très cohérents<sup>21</sup>. Le cancer du poumon est aujourd'hui le seul effet reconnu de l'exposition au radon. L'estimation du risque de cancer du poumon peut ainsi se faire sur la base de l'estimation de l'exposition cumulée des individus au radon, sans recourir au calcul de dose.

Les différents éléments utilisés pour l'évaluation des risques dans le présent rapport sont détaillés ci-dessous.

- 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 », pour chacune des situations d'exposition considérées.
- 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)<sup>22</sup>. 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 de 1,4% chez la femme. Le tabagisme est le facteur de risque principal du cancer du poumon. La probabilité de survenue d'un cancer du poumon est multipliée par un facteur de l'ordre de 10 à 30 entre un fumeur et un non-fumeur<sup>23</sup>. La population des occupants de la maison comprenant une grande partie d'enfants, l'évaluation s'est focalisée sur le risque de cancer du poumon sur des non-fumeurs. Pour s'affranchir de l'effet du tabac, les taux de mortalité par cancer du poumon d'individus n'ayant jamais fumé ont 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<sup>24</sup>. 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 à 0,37 % chez les femmes.
- Le modèle de risque utilisé est dérivé de l'étude européenne sur le risque de cancer du poumon associé au radon dans les habitations<sup>25</sup>. L'excès de risque relatif de cancer du poumon est de 0,16, pour une exposition à une

<sup>21</sup> Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon. Publication 115 de la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR 2010)

<sup>22</sup> 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

<sup>23</sup> Vineis, et al. Tobacco and cancer: Recent epidemiological evidence. J. of the National Cancer Institute 2004; 96(2):99-106.

<sup>24</sup> Thun MJ, et al. Lung cancer death rates in lifelong nonsmokers. J National Cancer Inst. 2006 May 17;98(10):691-9.

<sup>25</sup> 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.

concentration moyenne de  $100 \text{ Bq.m}^{-3}$  dans l'habitat pendant 25 années. Un délai de latence de 5 ans entre l'exposition et la survenue éventuelle d'un cancer du poumon est appliqué. Sur la base des résultats des études de mineurs d'uranium, il a en outre été considéré que l'excès de risque relatif de cancer du poumon s'annule au-delà de 30 ans après la fin de l'exposition. Cette hypothèse est sans doute également applicable aux enfants. Toutefois, en l'absence de données épidémiologiques disponibles chez l'enfant, un modèle de risque dans lequel l'excès de risque relatif reste constant au-delà de la fin de l'exposition a également été considéré pour les situations d'exposition durant l'enfance.

- La probabilité « vie entière » de décès par cancer du poumon en présence d'exposition au radon est calculée à partir des différents éléments ci-dessus. Elle dépend de la concentration de radon, du temps passé dans la maison et de l'âge au moment de l'exposition. Le risque relatif de mortalité associé à l'exposition au radon est alors obtenu en divisant la probabilité « vie entière » de décès par cancer du poumon en présence d'exposition au radon par la probabilité « vie entière » de base, c'est-à-dire la probabilité « vie entière » sans exposition additionnelle au radon.

#### 6.4 RESULTATS DE L'EVALUATION DU RISQUE DE CANCER DU POUMON

Les résultats d'évaluation de risque de décès par cancer du poumon sont présentés dans le tableau 6 pour chaque profil-type pour une année d'exposition. Les taux de base pour les hommes et les femmes n'ayant jamais fumé étant proches, les résultats présentés dans le tableau 6 sont moyennés pour les hommes et les femmes.

Tableau 6 : Probabilité de décès par cancer du poumon jusqu'à l'âge de 75 ans (Risque « vie entière ») pour chaque profil-type pour une année d'exposition (personne n'ayant jamais fumé)

	<i>Age à l'exposition</i>	<i>Risque « vie entière » de base</i>	<i>Risque « vie entière » avec exposition (*)</i>	<i>Ratio de risque « vie entière » (*)</i>
Adulte travaillant à domicile	50 ans	0,32 % **	0,61 %	1,93
Adulte travaillant à l'extérieur	50 ans	0,32 % **	0,53 %	1,69
Jeune adulte résident étudiant	20 ans	0,36 %	0,39 %	1,07
Enfant résident scolarisé	7 ans	0,36 %	0,37 % (0,58 %)	<1,01 (1,58)
Nourrisson résident	1 an	0,36 %	0,37 % (0,58 %)	<1,01 (1,60)
Enfant en garde périscolaire	7 ans	0,36 %	0,37 % (0,38 %)	<1,01 (1,04)
Enfant en nourrice	1 an	0,36 %	0,37 % (0,44 %)	<1,01 (1,19)

\* Le chiffre entre parenthèses correspond au résultat obtenu sous l'hypothèse conservatrice que pour les enfants l'excès de risque relatif ne s'annule pas trente ans après la fin de l'exposition.

\*\* Les valeurs du risque « vie entière » de l'adulte sont plus faibles que celles du jeune adulte ou des enfants car elles tiennent compte du fait que l'individu est indemne de cancer du poumon à l'âge de l'exposition.

Pour ce qui concerne les adultes, la probabilité de décès par cancer du poumon augmente, en lien avec une année d'exposition, d'un facteur 1,7 à 1,9.

Chez le jeune adulte résident, du fait des faibles taux de base de mortalité par cancer du poumon avant l'âge de 40 ans, ce facteur est moindre (ratio de risque = 1,1).

S'agissant des enfants, ce facteur est inférieur à 1,01 sous l'hypothèse que l'excès de risque relatif s'annule 30 ans après la fin de l'exposition. Il peut atteindre une valeur similaire à celle des adultes sous l'hypothèse que l'excès de risque relatif reste constant après la fin de l'exposition.

Ces estimations de risque pour une exposition annuelle ne permettent pas d'estimer le risque correspondant à une exposition de longue durée (plusieurs années), en particulier parce que le taux de décès par cancer de la population générale varie avec l'âge. La probabilité de décès associée à une durée d'exposition de plusieurs années doit donc faire l'objet d'un calcul ad-hoc.

Le tableau suivant (tableau 7) présente le risque de décès par cancer du poumon dans quelques cas types, avec des hypothèses de temps d'exposition sur plusieurs années, en fonction de l'âge.

Tableau 7 : Probabilité de décès par cancer du poumon jusqu'à l'âge de 75 ans (Risque « vie entière ») pour quelques situations illustratives (personne n'ayant jamais fumé)

	<i>Age à la fin de l'exposition</i>	<i>Durée d'exposition</i>	<i>Probabilité « vie entière » de base</i>	<i>Probabilité « vie entière » avec exposition (*)</i>	<i>Ratio de risque « vie entière » (*)</i>
Adulte travaillant à domicile	50 ans	20 ans	0,32 %**	4,08 %	13,02
Adulte travaillant à l'extérieur	50 ans	20 ans	0,32 %**	3,13 %	10,00
Jeune adulte résident***	20 ans	20 ans	0,36 %	0,51 % (4,49 %)	1,41 (12,40)
Enfant en garde périscolaire	7 ans	4 ans	0,36 %	0,37 % (0,43 %)	<1,01 (1,17)
Enfant en nourrice	3 ans	3 ans	0,36 %	0,37 % (0,58 %)	<1,01 (1,58)

\* Le chiffre entre parenthèses correspond au résultat obtenu sous l'hypothèse conservatrice que pour les enfants l'excès de risque relatif ne s'annule pas trente ans après la fin de l'exposition.

\*\* Les valeurs du risque « vie entière » de l'adulte sont plus faibles que celles du jeune adulte ou des enfants car elles tiennent compte du fait que l'individu est indemne de cancer du poumon à l'âge de fin de l'exposition.

\*\*\* L'évaluation d'exposition pour la situation de type jeune adulte résident considère le passage par les situations de type nourrisson, puis d'enfant scolarisé.

Pour ce qui concerne les adultes résidents, après 20 ans d'exposition, le niveau de risque relatif (environ 10 à 13) atteint des valeurs similaires à celui d'un fumeur régulier.

Chez le jeune adulte résident de 20 ans ayant été exposé durant toute son enfance, la probabilité « vie entière » de décès par cancer du poumon est augmentée d'un facteur 1,4 sous l'hypothèse que l'excès de risque relatif s'annule 30 ans après la fin de l'exposition. Si l'on suppose que l'excès de risque relatif reste constant après la fin de l'exposition, le ratio de risque est de 12,4, proche de la valeur obtenue pour les adultes.

S'agissant des différents cas d'enfants gardés, sous l'hypothèse que l'excès de risque relatif s'annule 30 ans après la fin de l'exposition, les résultats sont très similaires avec un ratio de risque « vie entière » de 1,01. Si l'on suppose que l'excès de risque relatif reste constant après la fin de l'exposition, le ratio de risque est de 1,2 pour l'enfant en garderie périscolaire et de 1,6 pour l'enfant en nourrice. Cette différence s'explique essentiellement par la durée d'exposition journalière plus longue en nourrice qu'en garderie périscolaire (tableau 4).

Pour les situations-types d'enfants en garde, la probabilité « vie entière » de décès par cancer du poumon reste inférieure à 1%.

Pour les adultes, après 20 ans d'exposition, cette probabilité est de l'ordre de 3 à 5%.

Il est à noter que tous les calculs ci-dessus reposent sur des taux de base de décès par cancer du poumon d'individus n'ayant jamais fumé.

## 6.5 EFFET DU TABAC SUR L'ÉVALUATION DU RISQUE DE CANCER DU POUMON

Le tabac et le radon sont deux agents cancérogènes pulmonaires. Comme indiqué précédemment (§ 6.1.1), 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 profils-types de personnes exposées au radon et supposés non-fumeurs, en considérant les taux de mortalité par cancer du poumon d'individus n'ayant jamais fumé pour les taux de base. Ce choix est justifié par la non connaissance du statut tabagique précis des occupants de la maison (quantité de cigarettes, durée du tabagisme, date de démarrage, date d'arrêt pour les ex-fumeurs...) et par le fait que plusieurs profils-types concernent des enfants.

En conséquence, pour estimer le risque vie entière après exposition au radon chez un fumeur, il faut tenir compte du risque relatif associé au tabac. Ce risque relatif varie entre 10 et 30 selon l'historique tabagique (âge à la première cigarette, durée de tabagisme, nombre de cigarettes par jour...). 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. Par exemple, pour le profil-type « adulte travaillant à l'extérieur » ayant résidé 20 ans dans la maison (tableau 7, 2<sup>e</sup> ligne), le risque relatif associé au radon est de 10. Considérant un risque relatif de 10 associé à un tabagisme régulier, la probabilité de décès par cancer du poumon « vie entière » associée aux deux facteurs conjugués serait comprise entre 6% ( $0,32\% \times (10+10-1)$ , hypothèse d'une interaction additive) et 32% ( $0,32\% \times (10 \times 10)$ , hypothèse d'une interaction multiplicative), à comparer à la probabilité de l'ordre de 3% estimée pour une exposition au seul radon (tableau 7, 2<sup>e</sup> ligne). Il est à noter que ce calcul ne constitue 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 risque « vie entière ».

## 6.6 ÉVALUATION DU RISQUE DE LEUCEMIE

Comme indiqué précédemment (§ 6.1.2), l'hypothèse d'une association entre l'exposition au radon et le risque de leucémie a été suggérée dans la littérature scientifique. L'existence d'une telle association n'est pas confirmée, mais étant donné les concentrations élevées enregistrées dans la maison de Bessines, la possibilité d'un

accroissement de la probabilité de survenue d'une leucémie chez les occupants ne peut pas être écartée. Néanmoins, plusieurs points doivent être considérés pour pondérer cette présomption :

- L'hypothèse d'un lien est principalement avancée pour les leucémies infantiles, c'est-à-dire survenant avant l'âge de 15 ans ; en l'occurrence, la plupart des occupants ont aujourd'hui dépassé cet âge.
- La leucémie est une maladie rare chez les enfants (incidence de 7 cas pour 10 000 enfants de la naissance à 14 ans). Même en cas d'augmentation du risque relatif du fait de l'exposition au radon, la probabilité individuelle de survenue de la maladie restera faible.
- Contrairement à ce qui existe pour le cancer du poumon, il n'existe pas à l'heure actuelle de modèle de risque reconnu permettant de quantifier le risque de leucémie associé à une exposition au radon. Une évaluation du risque reste possible en calculant la dose délivrée à la moelle osseuse et en utilisant un modèle de risque dérivé de l'étude des survivants des bombardements atomiques de Hiroshima et Nagasaki, mais cette approche est associée à de larges incertitudes<sup>26</sup> (hypothèses inhérentes au calcul des doses, validité du modèle de risque dans le cas de contaminations internes chroniques comme celles dont il s'agit avec le radon...).
- Plus de 90% de la dose reçue par un individu exposé au radon est délivrée au poumon, la dose à la moelle osseuse étant de l'ordre de 3% de la dose au poumon. Ainsi, pour une même exposition, l'excès de risque relatif attendu pour la leucémie est très inférieur à celui qui peut être estimé pour le cancer du poumon.

En conclusion, la probabilité de survenue de cas de leucémie apparaît faible mais ne peut pas être quantifiée, eu égard au manque de données scientifiques conclusives.

## **7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS**

L'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire a été chargé par les pouvoirs publics d'évaluer de manière la plus précise possible l'exposition radiologique et le risque sanitaire induit pour les différents occupants, habitants permanents et enfants gardés à domicile dans une maison de Bessines-sur-Gartempe, construite sur des stériles et résidus de minerais d'uranium.

Les évaluations menées par l'IRSN confirment les niveaux élevés de concentration de radon dans cette maison et le bienfondé de la mesure de relogement prise pour faire

---

<sup>26</sup> Laurent O, et al. Potential impacts of radon, terrestrial gamma and cosmic rays on childhood leukemia in France: a quantitative risk assessment. *Radiat Environ Biophys* 2013 52(2):195-209.



cesser l'exposition qui en résultait pour leurs occupants. Les autres voies d'exposition aux rayonnements ionisants ont été examinées et sont négligeables<sup>27</sup>.

En complément des investigations environnementales, des mesures anthroporadiométriques et radiotoxicologiques sur les urines ont été proposées aux occupants actuels et aux enfants gardés dans la maison, pour écarter l'hypothèse d'une contamination interne actuelle par du radium. Quarante-six personnes ont bénéficié d'un examen anthroporadiométrique. Quelques-unes d'entre elles ont présenté des traces de contamination, vraisemblablement liées à une inhalation de radon dans leur habitation actuelle. Des mesures de la concentration de radon à leurs domiciles respectifs sont en cours de réalisation (les premiers résultats seront connus fin avril 2014). Par ailleurs, les résultats des quarante-quatre examens d'urines qui ont été proposés devraient être disponibles mi-mai 2014.

Une évaluation de l'exposition au radon a été réalisée pour différents profils-types d'occupants et différentes durées de présence. Sur cette base, l'IRSN a évalué l'excès de risque de décès par cancer du poumon pour chacune des situations d'exposition, en se fondant sur un coefficient de risque issu d'une étude épidémiologique de l'exposition au radon dans l'habitat, ainsi que sur les statistiques disponibles de mortalité par cancer du poumon.

Pour des adultes résidant pendant une longue durée dans la maison (typiquement plus de 10 ans), l'exposition cumulée au radon peut conduire à une augmentation de la probabilité de décès par cancer du poumon similaire à celle entraînée par une consommation tabagique régulière (c'est-à-dire multipliée par 10 à 15 par rapport au taux de base d'un individu n'ayant jamais fumé). Pour un jeune de 20 ans ayant résidé dans la maison depuis sa naissance, la probabilité de décès par cancer du poumon est multipliée par un facteur de l'ordre de 1,4 (ce facteur serait similaire à celui des adultes dans l'hypothèse où l'excès de risque relatif resterait constant après la fin de l'exposition<sup>28</sup>). Pour les enfants gardés dans la maison, le facteur d'augmentation de la probabilité de cancer du poumon calculée pour une année de garde est nettement plus faible, inférieur à 1,01 (ce facteur serait de 1,2 et 1,6 dans l'hypothèse où l'excès de risque relatif reste constant après la fin de l'exposition, respectivement pour l'enfant en garderie périscolaire et pour l'enfant en nourrice).

Il est à noter que tous les calculs d'évaluation des risques reposent sur des taux de base de décès par cancer du poumon d'individus n'ayant pas fumé. En conséquence, ces évaluations sont faites en excluant toute habitude tabagique dont il est rappelé qu'elle joue un rôle fortement aggravant dans le risque de survenue du cancer du poumon. A titre d'exemple, l'adulte âgé de 50 ans ayant occupé la maison pendant 20 ans et travaillant à l'extérieur a une probabilité de survenue de cancer du poumon « vie

<sup>27</sup> L'IRSN n'a pas recherché la présence éventuelle de polluants de l'air intérieur de la maison, en dehors des éléments radioactifs.

<sup>28</sup> Contrairement à l'hypothèse que l'excès de risque relatif de cancer du poumon s'annule au-delà de 30 ans après la fin de l'exposition.

entière » de l'ordre de 3% s'il est non-fumeur, et entre 10% et 70%, selon les hypothèses, s'il est fumeur.

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.**

#### Recommandations

- Il semble opportun que les médecins référents soient informés sur l'exposition de leurs patients et les estimations de risque pour leur santé, par exemple sur la base du présent rapport et le cas échéant des fiches d'évaluation de risque individuelles établies par l'IRSN. L'exposition importante au radon devrait être tracée dans le dossier médical des personnes.
- Un bilan de santé initial peut être réalisé, comprenant un bilan sanguin (numération formule sanguine) et un accompagnement psychologique peut être proposé.
- Compte tenu du niveau élevé des expositions, l'IRSN estime souhaitable que soit recherché un consensus médical, avec la contribution des agences de santé compétentes, sur l'opportunité de la mise en place d'un suivi de long terme des personnes exposées, et sur la nature d'un tel suivi.
- Les recommandations suivantes devraient être communiquées aux personnes concernées :
  - o éviter tout tabagisme (y compris passif), compte tenu de la synergie entre radon et tabac ;
  - o éviter, de manière générale, l'exposition respiratoire à des composés irritants ou à des toxiques ;
  - o veiller à éviter toute exposition excessive au radon à l'avenir, en sollicitant en cas de doute un dépistage de radon dans leur logement.

0 - 0 - 0

Plan maison 1 avenue de Limoges - Bessines

