

Gaz radioactif d'origine naturelle, le radon issu de l'écorce terrestre tend à s'accumuler dans les bâtiments. Un premier cadre réglementaire pour des bâtiments recevant du public de départements déclarés prioritaires s'est récemment mis en place. Des réflexions sont en cours pour la protection des bâtiments neufs et de l'habitat existant. Les solutions pour empêcher ou réduire l'accumulation dans les bâtiments existent et doivent être adaptées aux différents cas de bâtiments et d'usage.



Le radon dans les bâtiments



Bernard Collignan

RESPONSABLE DU PÔLE VENTILATION ET
AMBIANCES INTÉRIEURES
DÉPARTEMENT DÉVELOPPEMENT DURABLE
CSTB
bernard.collignan@cstb.fr

Le radon est un gaz radioactif qui provient de la dégradation de l'uranium et du radium présents dans la croûte terrestre. À partir du sol et de l'eau, le radon diffuse dans l'air et se trouve, par effet de confinement, à des concentrations plus élevées à l'intérieur des bâtiments qu'à l'extérieur. Les descendants solides du radon sont alors inhalés avec l'air respiré et se déposent dans les poumons. Le radon constitue la part la plus importante de l'exposition aux rayonnements naturels reçus par l'homme, en France de même que dans le monde.

Les risques pour la santé liés à l'exposition au radon ont été établis à partir de nombreuses études menées chez l'homme (en particulier auprès des ouvriers des mines) et chez

l'animal, faisant apparaître un lien avec le cancer du poumon. Si les preuves épidémiologiques directes de l'impact sanitaire du radon aux faibles concentrations font l'objet de débats, l'estimation indirecte, mais plausible, des risques

“ Le radon constitue la part la plus importante de l'exposition aux rayonnements naturels reçus par l'homme. ”

fondés sur l'extrapolation des courbes doses-risques établies aux fortes expositions conduit à attribuer au radon plusieurs milliers de cas annuels de cancer du poumon en France liés à l'exposition dans les bâtiments.

“ Le sol est en général la cause principale de la présence de radon dans l'air intérieur des bâtiments. ”

Le sol est en général la cause principale de la présence de radon dans l'air intérieur des bâtiments (Figure 1). L'entrée du radon dans les bâtiments résulte de nombreux paramètres (concentration dans le sol, perméabilité et humidité du sol, présence de fissures ou de fractures dans la roche sous-jacente) et notamment des caractéristiques propres de l'habitat (procédé de construction, fissuration de la surface en contact avec le sol, système de ventilation...). Dans une moindre mesure, la présence de radon dans les locaux habités peut cependant avoir d'autres origines : l'air extérieur, les matériaux de construction, l'eau à usage domestique.

La prise de conscience du problème en France est relativement récente. Un premier cadre réglementaire existe et des travaux sont en cours pour définir la démarche concernant les constructions neuves et l'habitat existant. La mesure du radon dans les bâtiments s'effectue dans un premier temps à l'aide de dosimètres passifs permettant de réaliser un dépistage dans le bâtiment. Il existe un ensemble de techniques de réduction dans les bâtiments à décliner en fonction du type de bâtiment et de son usage.

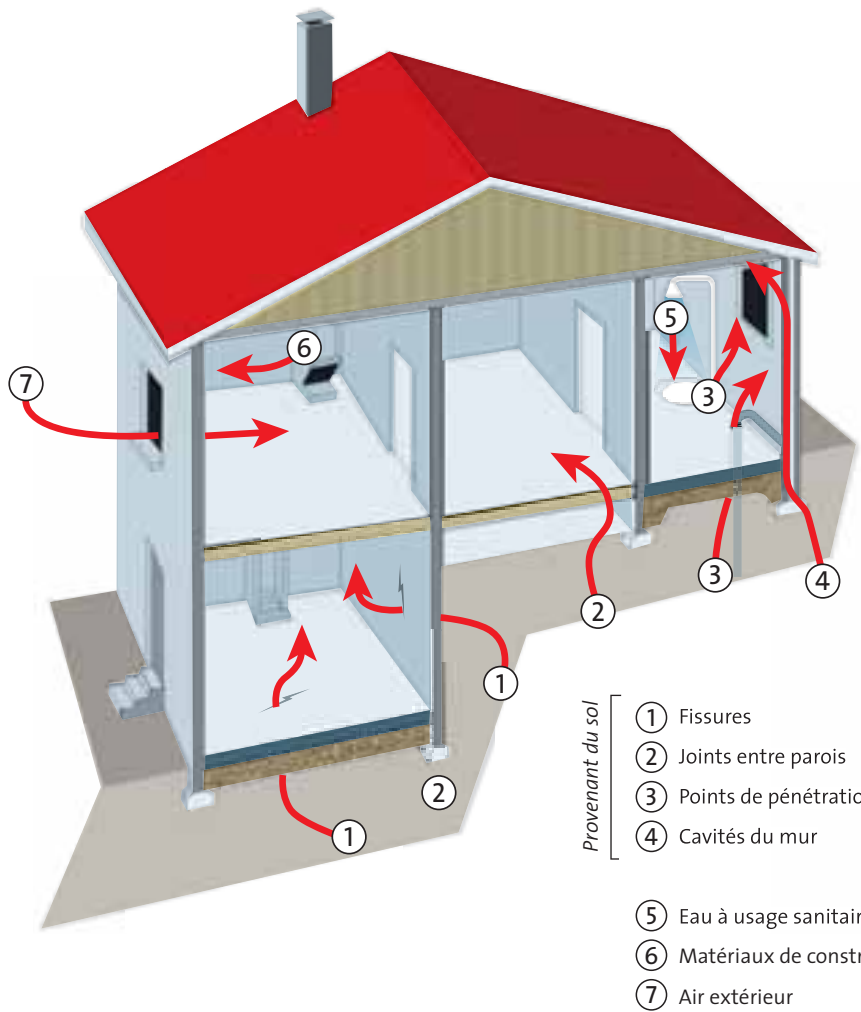


Fig. 1 : Voies d'entrée du radon dans un bâtiment.
 Fig. 1: Entry routes for radon into a building.
 Source : CSTB.



José Perrin

GÉOPHYSICIEN
SERVICE CONNAISSANCE ET
DIFFUSION DE L'INFORMATION
GÉOLOGIQUE
BRGM
j.perrin@brgm.fr

L'étude du radon dans un milieu géologique constitue une méthode rigoureuse pour identifier et délimiter les territoires présentant le risque le plus grand de niveaux élevés en gaz radon. Cette approche est la plus sûre en matière de prévision. La mesure de la concentration en radon dans l'habitat reste cependant la méthode la plus directe pour déterminer le risque d'exposition à de fortes teneurs.

L'évaluation de l'aléa radon doit prendre en compte trois termes :

- source (matières pouvant émettre du radon),
- vecteur (moyens empruntés par le radon pour migrer depuis son lieu de production jusqu'à un bâtiment),
- piégeage dans l'habitat (cf. article de B. Collignan, dans ce numéro).

Dans sa démarche, le géologue analyse la distribution des sources du radon dans le sous-sol et détermine comment celui-ci trouve son chemin jusqu'à la surface.

À l'origine du radon : l'uranium

L'origine de ce gaz radioactif qui provient de la désintégration du radium, lui-même descendant de l'uranium pour l'essentiel, constitue le fondement de la géologie du radon. La présence du radon dans

notre environnement est conditionnée par l'abondance de ses précurseurs et limitée par sa période radioactive (temps nécessaire pour que la moitié se transforme par désintégration).

Cette période est courte (3,8 j.), mais son arrière-arrière-grand-parent uranium est suffisamment répandu dans la croûte terrestre (teneur moyenne estimée à environ 3 g/t) pour assurer le renouvellement de sa production partout à la surface du globe.

En réalité l'étude géochimique des roches révèle une grande disparité dans la répartition de l'uranium terrestre en relation avec ses affinités chimiques et sa difficulté à s'insérer dans les réseaux cristallins minéraux. Cette variabilité des teneurs uranium se traduit par des différences de premier ordre dans les taux de production de radon. Corrélativement, la probabilité d'avoir des concentrations radon excessives dans l'habitat change selon la nature du substrat géologique. L'uranium est présent dans toutes les roches d'origine magmatique, les plus fortes teneurs sont trouvées dans les granites, dans les gneiss et dans les roches volcaniques claires dites acides. Les régions géologiques de nature magmatique sont particulièrement concernées notamment la Bretagne, le Massif central, la Corse et les Vosges, comme le confirme la mise en regard de la carte géologique de France à celle de la répartition départementale des concentrations radon relevées par l'IRSN dans l'habitat (cf. figure 2, article de B. Collignan, ce numéro). Dans certains granites la teneur en uranium dépasse de

beaucoup la teneur moyenne : dans ceux du Limousin et de Vendée elle peut s'élever à 20 g/t.

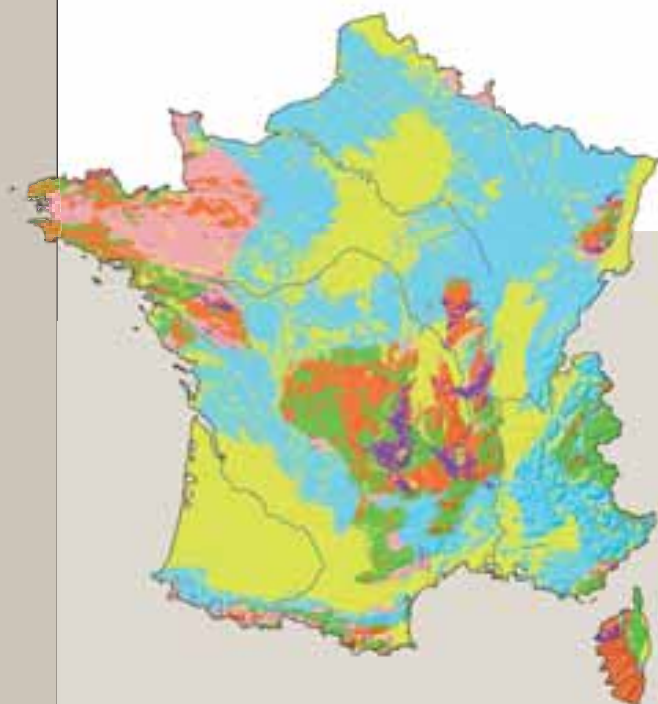
Dans les formations sédimentaires, l'affinité de l'uranium pour la matière organique joue un rôle important dans sa concentration, ainsi on le trouve fréquemment dans les schistes noirs graphiteux. Il est parfois présent dans les bassins détritiques contenant des dépôts argilo-gréseux issus de l'érosion de roches riches en uranium. Enfin, il a une très grande affinité pour les sédiments phosphatés. En général le contenu en uranium des sols est identique à celui des roches dont ils dérivent.

La production du radon

La capacité du radon à s'échapper de la matrice minérale – on parle de pouvoir d'émanation – dépend de la structure intime de la roche. Le coefficient de diffusion du radon dans les matériaux cristallins est très faible ($<10^{-24} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), seuls les atomes de radon libérés dans l'espace poreux sont susceptibles de migrer. Seulement 10 à 50 % du radon produit parviennent à circuler dans les interstices de la roche. Les mécanismes de l'émanation, activés par la dissipation de l'énergie de désintégration, sont complexes. Son efficacité est optimale dans des roches grenues, fissurées et humides, où le radium est bien réparti à la surface des grains minéraux. Les conglomérats, les gneiss, les granites anciens riches en micas ont les meilleurs taux d'émanation. Exception faite des sols argileux, le pouvoir d'émanation des sols est toujours nettement supérieur à celui du substrat rocheux.

La mobilité du radon

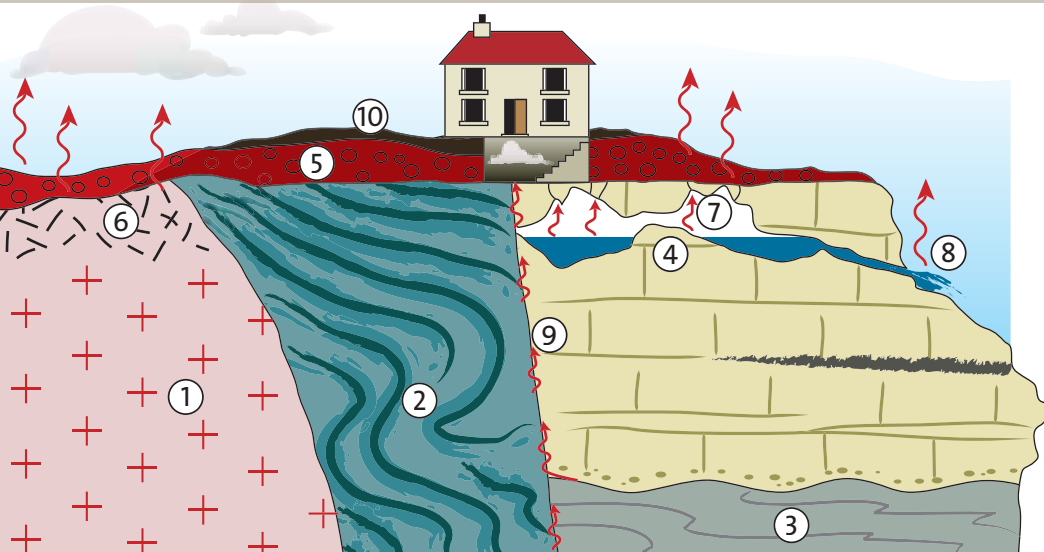
Gaz inerte, le radon a une beaucoup plus grande mobilité que l'uranium ou le radium qui sont fixés dans la matière solide de la roche. Mais du fait de sa courte période radioactive, la quantité qui s'échappe dans l'atmosphère dépend de la profondeur à laquelle il est formé et de l'efficacité de son transport à travers le milieu rocheux. En premier lieu, il faut que la roche ou le sol possède une grande proportion de pores ayant une interconnexion importante de façon à offrir une bonne aptitude à transmettre l'eau ou l'air (nommée perméabilité). Le radon se déplace plus rapidement à travers des sols perméables formés par exemple de sables grossiers et de graviers qu'à travers des argiles imperméables. Les fissures dans n'importe quel type de roche facilitent le déplacement du radon. Les propriétés de diffusion du gaz radon permettent d'évaluer la distance moyenne qu'il peut parcourir avant de se désintégrer : elle est de l'ordre de quelques centimètres dans l'eau et peut atteindre plusieurs mètres dans les sols secs. Ainsi, l'essentiel du radon observé à la surface du sol serait formé à faible profondeur, à moins de mettre en jeu un autre mécanisme de transport que celui de la simple diffusion. La migration du radon sur



◀ Fig. 1 : Carte géologique de la France.

Fig. 1: The geological map of France.

- Roches plutoniques (granites...)
- Roches métamorphiques (gneiss...)
- Roches volcaniques (basaltes...)
- Roches sédimentaires déformées (schistes, grès... ; > 250 Ma)
- Roches sédimentaires (calcaires, marnes... ; 250-23 Ma)
- Roches sédimentaires (sables, graviers... ; 23 Ma à actuel)



▲ Fig. 2 : Les processus naturels d'exposition au radon.
D'après P. Barrier, Géochronique n° 78 (2001).
Fig. 2: The natural processes of radon exposure, from P. Barrier, Géochronique No. 78 (2001).

- 1 Massif granitique / Granite massif
- 2 Schistes noirs / Black shale
- 3 Substratum / Substratum
- 4 Massif karstique / Karst massif
- 5 Formations superficielles / Surficial formations
- 6 Fractures / Fractures
- 7 Cavités souterraines / Underground caves
- 8 Eaux souterraines / Groundwater
- 9 Faille / Fault
- 10 Sols perméables / Permeable soil

de grandes distances est possible par advection ; beaucoup de radon est transporté par les eaux souterraines, dans lesquelles il est soluble en grande proportion, et par le dégazage naturel de la terre qui produit un flux permanent de gaz carbonique, d'azote et en moindre proportion d'hélium ou de méthane. Ces dégazages, spectaculaires au niveau des volcans et des sources thermales, sont bien connus dans les zones de sismicité active, mais existent aussi de façon plus discrète ailleurs. Les discontinuités fragmentant la croûte terrestre à toutes les échelles, constituent les lieux préférentiels de ces circulations de gaz qui entraînent au passage le radon. Les vitesses de transport associées à ces processus peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres par heure. C'est pourquoi des quantités importantes de radon sont connues au niveau des failles actives et sur les champs géothermiques. Le rôle des failles est également attesté dans les massifs calcaires. Ces roches sont généralement très pauvres en radium, pourtant il est courant d'y trouver localement des concentrations radon élevées. Elles s'expliquent presque toujours par un réseau de fractures développé qui draine le radon du socle sous-jacent et par un système karstique favorisant le processus d'advection. Citons également les galeries souterraines dont le rôle de collecte et de transport rapide du radon est bien connu dans les travaux miniers.

En résumé, un site ayant un sol sec, bien drainé et fortement perméable comme des arènes granitiques

grossières, reposant sur un substrat rocheux fissuré ou caverneux, réunit les critères favorables à une exhalation importante de radon.

Cartes de potentiel radon

On peut ainsi se faire une bonne idée du niveau de l'aléa radon pour un territoire en étudiant sa géologie. Une habitation construite dans une zone ayant un fort potentiel radon est très probablement concernée par le risque radon. Toutefois, une architecture défaillante augmente ce risque et peut conduire à des niveaux de radon insalubres, y compris dans une zone de faible potentiel et inversement (cf. article de B. Collignan, ce numéro).

Le géologue évalue le potentiel radon d'un secteur et établit des « cartes de potentiel radon » en croisant une multitude de critères, parmi lesquels : le contenu en uranium du substrat rocheux et du sol, la structure de la roche et son pouvoir d'émanation, la distance aux failles ouvertes, la perméabilité et l'humidité des sols... Tous ces paramètres ne sont pas toujours disponibles partout ; il utilise alors des informations indirectes qu'il recueille sur les cartes géologiques, les cartes

de radioactivité et les cartes pédologiques.

La carte géologique renseigne sur l'extension des affleurements rocheux pouvant contenir des niveaux élevés d'uranium, sur l'organisation du réseau de failles et la localisation des accidents profonds aptes à collecter une grande quantité radon. Elle peut également fournir des éléments sur la nature des formations superficielles qui jouent, avec les sols, un rôle clé dans la dissipation du radon hors du domaine géologique.

Les cartes de radioactivité établies à partir de levés géophysiques aériens, permettent d'apprécier assez précisément le niveau de fond en uranium des roches et des matériaux du proche sous-sol. Les techniques aéro-spectrométriques utilisées actuellement, mises en œuvre à partir d'un avion volant à basse altitude selon un maillage serré, donnent accès à une résolution de l'ordre de quelques hectares. Les instruments embarqués détectent la radioactivité liée à la filiation de l'uranium, ou pour être plus précis, celle signée par le bismuth, un proche descendant du radon. C'est pourquoi on observe généralement une bonne corrélation entre les cartes spectrométriques et le contenu radon des sols.

Le BRGM a réalisé en 1998 un levé de ce type couvrant l'ensemble du massif Armoricaire dont les résultats ont contribué à la cartographie du potentiel radon des régions Pays de la Loire et Basse-Normandie. ■

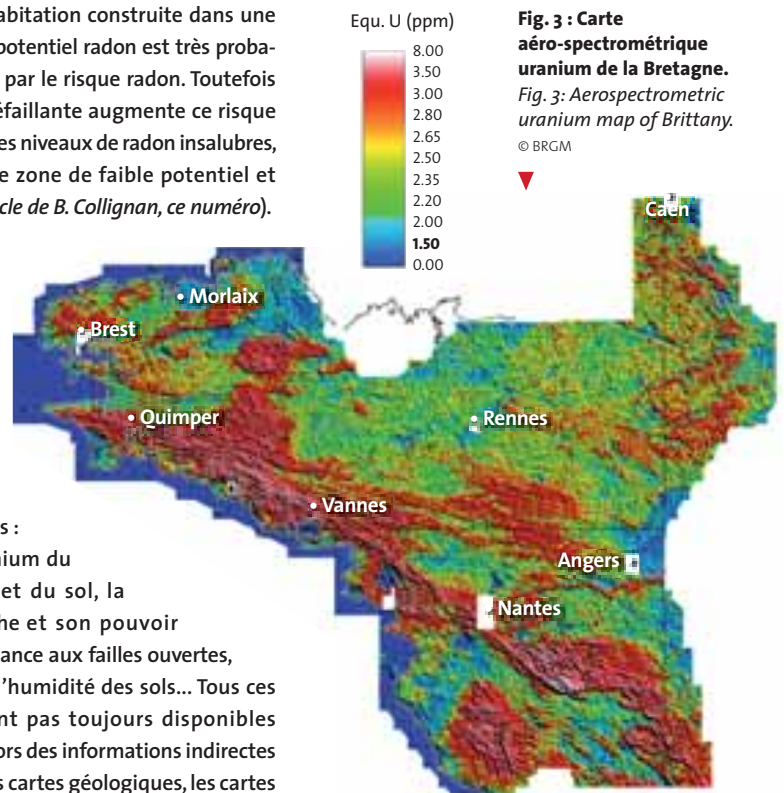


Fig. 3 : Carte aéro-spectrométrique uranium de la Bretagne.
Fig. 3: Aerometric uranium map of Brittany.
 © BRGM



Cadre réglementaire

Une cartographie de l'exposition au radon dans l'habitat a été dressée par l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), avec l'aide des Directions Départementales des Affaires Sanitaires et Sociales (DDASS). Cette cartographie est fondée sur plus de 12 000 mesures réalisées dans des logements entre 1990 et 2001 (figure 2).

Cette cartographie a servi de fondement à la définition de 31 départements prioritaires présentés ci-dessous (figure 3).

Sur cette base, les pouvoirs publics ont rédigé le décret n° 2002-460 du 4 avril 2002 relatif à la protection générale des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants. Pour les départements prioritaires mentionnés ci-dessous (figure 3), ce décret donne obligation aux propriétaires de lieux ouverts au public (établissements scolaires, établissements sanitaires et sociaux avec capacité d'hébergement, établissements thermaux, prisons) de réaliser des dépistages de radon et de mettre en œuvre des actions correctrices lorsque nécessaire (art. 43.10).

Fig. 3 : Liste des 31 départements prioritaires pour la protection générale des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants.

Fig.3: List of the 31 prioritized French Departments for overall protection of the public against the dangers of ionizing radiation.



N°	Département	N°	Département
3	Allier	43	Haute-Loire
5	Hautes-Alpes	48	Lozère
7	Ardèche	52	Haute-Marne
9	Ariège	56	Morbihan
12	Aveyron	58	Nièvre
14	Calvados	63	Puy-de-Dôme
15	Cantal	65	Hautes-Pyrénées
19	Corrèze	69	Rhône
2A	Corse-du-Sud	70	Haute-Saône
2B	Haute-Corse	71	Saône-et-Loire
22	Côtes-d'Armor	73	Savoie
23	Creuse	79	Deux-Sèvres
25	Doubs	87	Haute-Vienne
29	Finistère	88	Vosges
36	Indre	90	Territoire de Belfort
42	Loire		

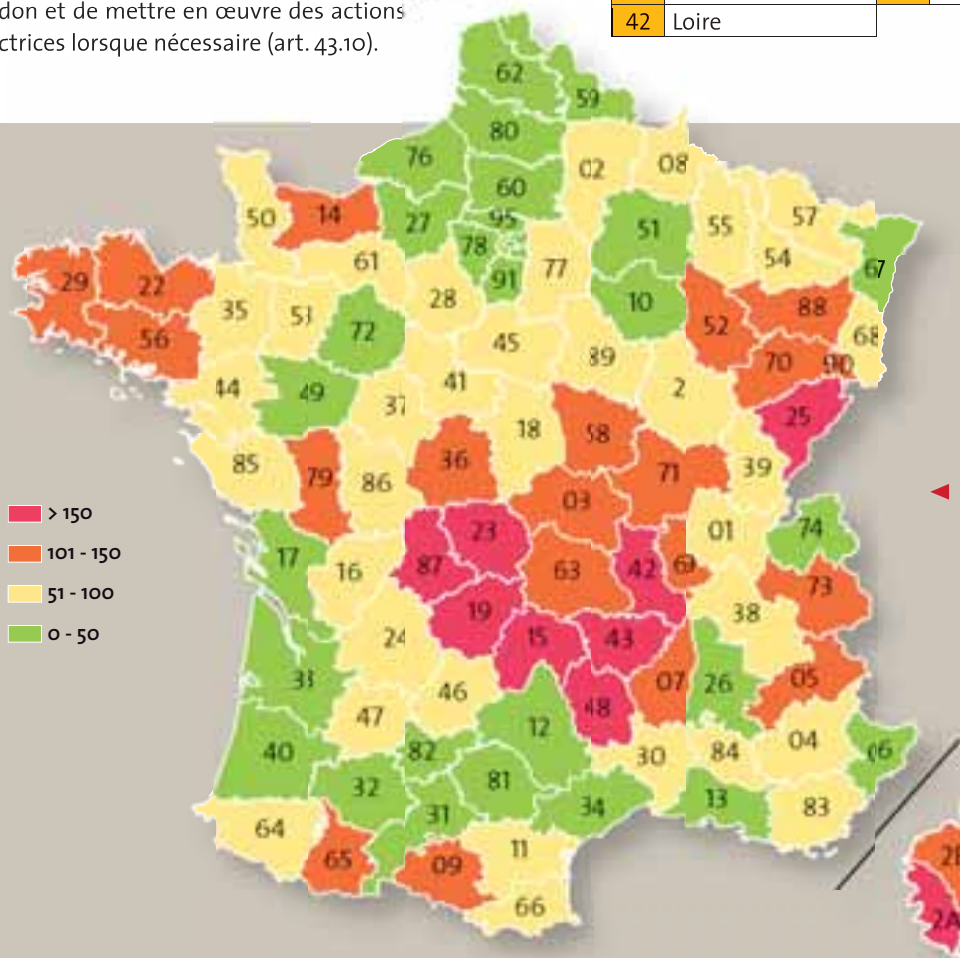


Fig. 2 : Moyenne départementale des concentrations de radon dans l'air des habitations.

Fig. 2: Mean values of radon concentrations in dwellings per French Department.

Source : IRSN.

En dessous de 400 Bq/m³, la situation ne justifie pas d'action correctrice particulière ; entre 400 et 1 000 Bq/m³, il est souhaitable d'entreprendre des actions correctrices simples. Au-delà de 1 000 Bq/m³, des actions correctrices, éventuellement d'envergure, doivent être impérativement conduites à bref délai, car on aborde un niveau de risque qui peut être important.

Deux arrêtés d'application complètent ce décret :

► **Arrêté d'application du 15 juillet 2003 relatif aux conditions d'agrément d'organismes habilités à procéder aux mesures d'activité volumique du radon dans les lieux ouverts au public** (J.O. n° 188 du 15 août 2003, page 14103).

Cet arrêté définit deux niveaux d'agrément :

- N1 : pour réaliser le dépistage du radon dans les bâtiments,
- N2 : pour réaliser des mesures de radon complémentaires, en soutien éventuel du diagnostic du bâtiment. Chaque année, les pouvoirs publics publient la liste des organismes agréés par voie d'arrêté.

► **Arrêté du 22 juillet 2004 relatif aux modalités de gestion du risque lié au radon dans les lieux ouverts au public** (J.O. n° 185 du 11 août 2004, page 14359, texte n° 25).

Les dispositions de cet arrêté déterminent les modalités de gestion du risque lié au radon dans les lieux ouverts au public. Cet arrêté est complété par deux avis pris en application de cet arrêté. Le premier (J.O. n° 186 du 12 août 2004, page 14428, texte n° 72) liste les normes de mesure du radon en vigueur. Le deuxième (J.O. n° 44 du 22 février 2005, page 2982, texte n° 116) définit les actions à mettre en œuvre dans les bâtiments pour réduire l'exposition des personnes au radon à un niveau aussi bas que raisonnablement possible, et doit être annexé aux rapports d'intervention des organismes agréés pour la mesure du radon.

Enfin, pour donner suite aux actions proposées dans le cadre du Plan National Santé Environnement (PNSE), adopté par le gouvernement en juin 2004, un plan d'action interministériel et pluriannuel sur la gestion du risque lié au radon a été lancé. Il est animé par la Direction Générale de la Sécurité Nucléaire et de la Radioprotection (DGSNR) et décline les actions à entreprendre pour réduire les expositions au radon dans les bâtiments. Il est organisé autour de trois grands axes :

- mettre en place une nouvelle politique pour la

- gestion du risque lié au radon dans l'habitat et la construction neuve,
- accompagner la mise en œuvre de la nouvelle réglementation concernant les lieux ouverts au public,
- améliorer et diffuser les connaissances sur les expositions et le risque lié au radon.

La mesure du radon

La concentration en radon (ou activité volumique) dans un bâtiment est très variable dans le temps en fonction des conditions environnementales et des caractéristiques du bâtiment. Trois types de mesure, codifiés par l'AFNOR, sont à distinguer, selon les caractéristiques du prélèvement d'air :

► **la mesure intégrée**, requise par les circulaires et le décret ministériels relatifs au radon, effectuée sur une période de l'ordre de deux mois en saison de chauffage et en conservant les mêmes habitudes d'utilisation du bâtiment (chauffage, aération), pour donner un résultat représentatif de la valeur moyenne annuelle. C'est cette mesure qui est utilisée pour le dépistage dans les bâtiments **conformément à la norme NF M 60-771**. En pratique, cette mesure s'effectue à l'aide de dosimètres passifs ;

► **la mesure ponctuelle**, effectuée sur un laps de temps très bref, de l'ordre de quelques secondes à une minute maximum, qui fournit une « photographie » de la situation à un moment donné ;

► **la mesure en continu**, permettant de suivre l'évolution de la concentration en fonction du temps.

Pour toute mesure de radon dans l'environnement ou dans une atmosphère confinée, il est nécessaire de préciser la durée et la date du prélèvement. En effet, l'activité du radon présentant une très grande variabilité dans le temps, les résultats obtenus sont très différents selon la durée du prélèvement (quelques minutes, quelques heures ou plusieurs mois) et ils ne sont pas comparables.

“ La concentration en radon dans un bâtiment est très variable dans le temps en fonction des conditions environnementales et des caractéristiques du bâtiment. ”



À l'intérieur d'un bâtiment, le choix de l'implantation et le nombre de points de prélèvement dépendent de l'objectif de la mesure (dépistage, recherche de sources, étude de transfert, vérification de l'homogénéité du paramètre mesuré dans un environnement ou recherche d'anomalies, exposition de l'homme, etc.), des caractéristiques architecturales du bâtiment (vide sanitaire, sous-sol, étage, terre battue, matériau de construction, etc.), des caractéristiques de la pièce et également du type d'appareil de mesure utilisé (voir norme NF M 60-771).

Il existe également des méthodes de mesure pour caractériser la quantité de radon arrivant à l'interface sol-atmosphère, soit le flux d'exhalation du radon.

Se protéger du radon dans les bâtiments

Les principes des techniques visant à diminuer la présence de radon dans les bâtiments consistent d'une part à diluer la concentration en radon dans le volume habité, et d'autre part à empêcher le radon venant du sol d'y pénétrer.

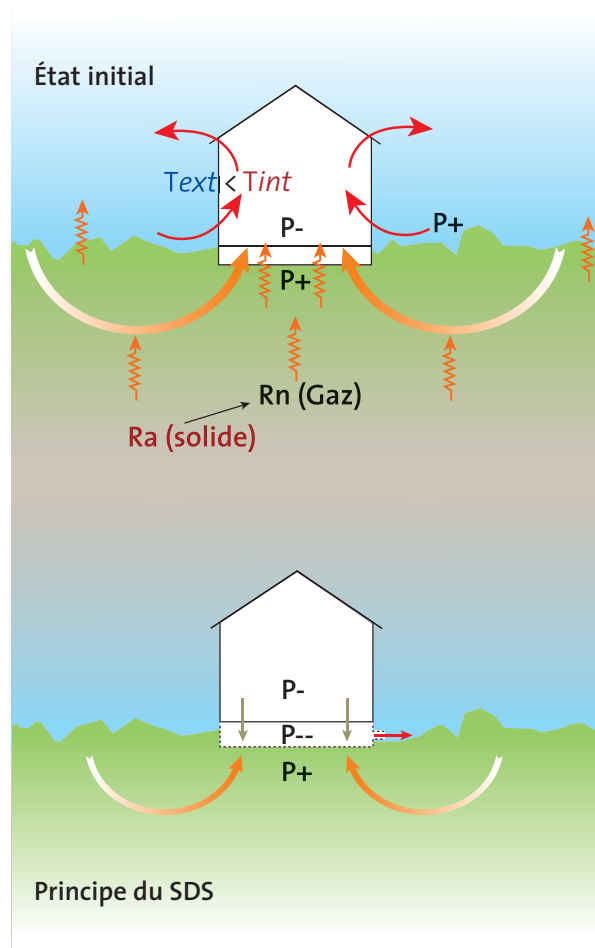
En pratique, on observe de nombreuses variantes techniques faisant appel à ces deux principes conjugués. De façon générique, on peut distinguer trois familles de techniques.

En premier lieu, il est indispensable d'assurer la meilleure étanchéité à l'air possible entre le bâtiment et son sous-sol. Si les techniques d'étanchement ne sont pas toujours suffisantes pour réduire efficacement les concentrations en radon dans un bâtiment (identification incomplète des points d'entrée, problèmes de mise en œuvre, efficacité au cours du temps), elles constituent cependant un préalable essentiel à l'efficacité d'autres solutions pouvant être mises en œuvre en parallèle.

Une deuxième famille de solutions consiste à diluer le radon présent dans le bâtiment en augmentant le renouvellement d'air de ce dernier. L'efficacité de cette solution est cependant assez faible car on ne peut pas augmenter le renouvellement d'air d'un bâtiment inconsidérément sans tenir compte des contraintes énergétiques et de confort thermique.

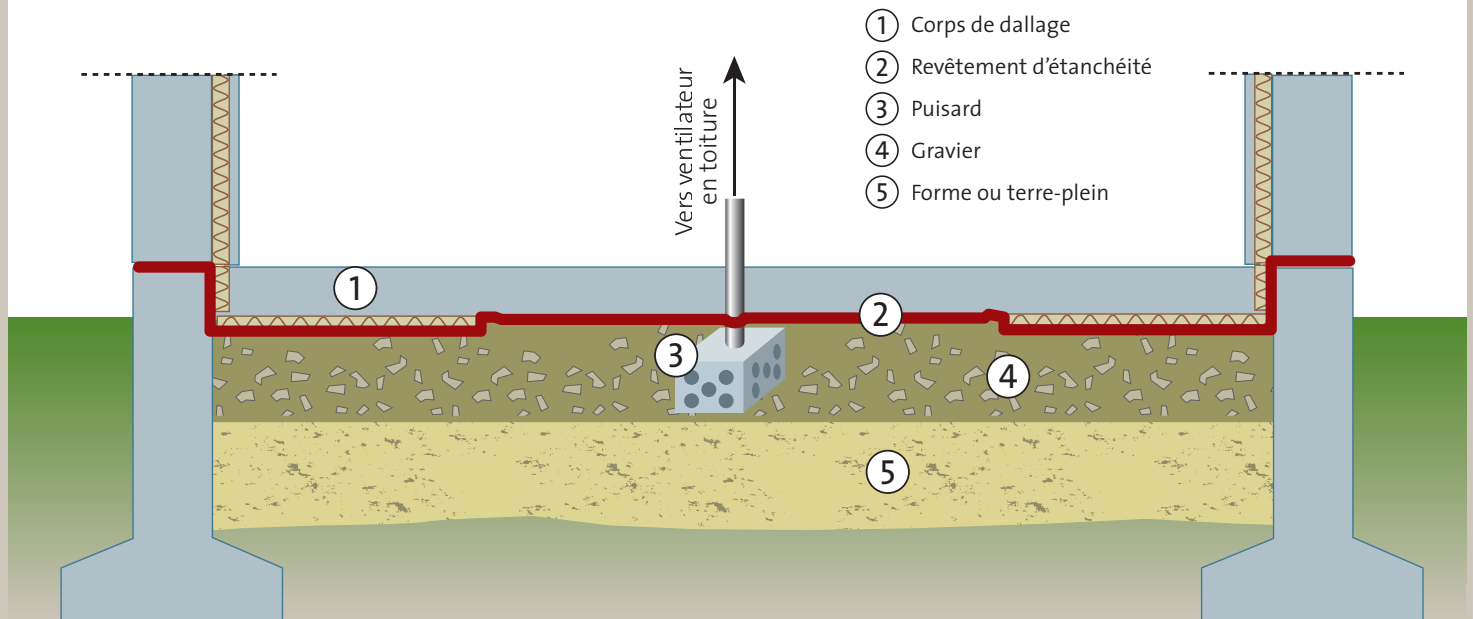
Enfin, la troisième famille de techniques consiste à traiter le soubassement (vide sanitaire, cave, dallage

sur terre-plein). Ce traitement peut être effectué par aération naturelle ou par ventilation mécanique. Cependant, le principe de réduction de l'entrée du radon dans les bâtiments le plus efficace repose sur le Système de Dépressurisation des sols (SDS). En effet, l'objectif de cette dernière technique consiste à générer un champ de pression dans le soubassement inférieur à celui régnant au niveau du sol du bâtiment, à un débit le plus faible possible. Pour cela, l'air du



“ Les principes des techniques visant à diminuer la présence de radon dans les bâtiments consistent d'une part à diluer la concentration en radon dans le volume habité, et d'autre part à empêcher le radon venant du sol d'y pénétrer. ”

Principe de mise en œuvre dans le cas d'un dallage indépendant sur terre-plein



▲ **Fig. 4 : Principe du Système de Dépressurisation des Sols.**
 Fig. 4: The soil depressurization system principle.

Source : CSTB.

soubassement est extrait mécaniquement vers l'environnement extérieur où le radon se dilue rapidement. On empêche ainsi les mouvements convectifs de l'air contenu dans la porosité du sol et chargé en radon vers le bâtiment (figure 4).

L'adaptation de ces techniques à la construction neuve présente l'avantage de les intégrer dès la conception du bâtiment. Leur efficacité sera donc améliorée et le coût marginal. Dans les bâtiments existants, les moyens à mettre en œuvre pour lutter contre la

présence de radon dans l'air intérieur sont à considérer en fonction des niveaux de concentration moyenne annuelle mesurés dans le bâtiment et des caractéristiques de ce dernier. Pour cela, un diagnostic du bâtiment doit être effectué. Selon les cas typologiques rencontrés et les niveaux initiaux de concentration, les mesures correctrices peuvent être réalisées de façon itérative afin de minimiser l'investissement fait pour lutter contre ce problème. ■

► EXPOSITION AU RADON ET RISQUE DE CANCER DU POUMON : BILAN À PARTIR DES ÉTUDES ÉPIDÉMIOLOGIQUES

EXPOSURE TO RADON AND LUNG CANCER RISK: CONCLUSIONS DRAWN FROM EPIDEMIOLOGICAL STUDIES



Margot Tirmarche

CHEF DU LABORATOIRE
D'ÉPIDÉMIOLOGIE
DIRECTION DE LA
RADIOPROTECTION DE L'HOMME
INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE (IRSN)
margot.tirmarche@irsn.fr

28

De nombreuses études épidémiologiques ont été mises en place à travers le monde dans le but de quantifier le risque de cancer associé à l'inhalation du radon. Dès 1988, l'OMS a classé le radon comme cancérigène pulmonaire certain chez l'homme. La plupart des données alors disponibles provenaient d'études animales ou d'études épidémiologiques menées en milieu professionnel, notamment sur

“*Le risque de cancer du poumon augmente proportionnellement à la quantité de radon (et de ses descendants radioactifs) inhalé, notamment durant les 25 années précédant la maladie.*”

les mineurs de fond exposés dans le passé à des expositions relativement élevées. Aujourd'hui, il est à noter que peu de polluants de l'habitat ont été étudiés de façon aussi détaillée que le radon.

Du fait du caractère ubiquitaire du radon, la question de l'extrapolation des risques des fortes expositions (rencontrées généralement dans les mines) aux faibles expositions (rencontrées dans les habitations) s'est très vite posée. C'est notamment pour y répondre que plusieurs études épidémiologiques ont été réalisées en Europe, en Amérique du Nord et en Chine. En France, le laboratoire d'épidémiologie de l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire a mené une telle étude sur plusieurs années, en étroite collaboration avec les services hospitaliers des Ardennes, de Bretagne, du Massif central et du Languedoc-Roussillon. Ces études de terrain ont permis de quantifier la relation exposition-réponse à partir de données recueillies en population générale. De nombreuses informations individuelles ont ainsi été collectées notamment sur la consommation tabagique et sur les expositions professionnelles susceptibles d'intervenir comme cofacteurs dans le développement du cancer du poumon. Les mesures de radon ont été réalisées dans les différentes habitations occupées durant

les trente dernières années, en accord avec les occupants actuels de ces maisons. Le principal apport de ces études est d'avoir mis en évidence la persistance du risque de décès par cancer du poumon dans le domaine des faibles niveaux d'exposition rencontrés dans les habitations. L'étude a démontré que le risque de cancer du poumon augmente proportionnellement à la quantité de radon (et de ses descendants radioactifs) inhalé, notamment durant les 25 années précédant la maladie. Ce résultat persiste après avoir ajusté sur la consommation tabagique et les autres expositions professionnelles potentiellement cancérigènes. Le risque lié à l'inhalation du radon est faible comparativement à celui du tabac, mais il a pu être mis en évidence à la fois chez les

non-fumeurs et chez les fumeurs ou ex-fumeurs. Se pose aujourd'hui la question de la quantification d'une interaction entre la consommation tabagique et l'exposition au radon durant le développement d'un cancer du poumon. Une telle interaction a été suggérée par les études prospectives réalisées sur des mineurs. L'IRSN continue actuellement le suivi des mineurs d'uranium en France, en collaboration avec la médecine du travail d'Areva NC. Les études en milieu professionnel nous renseignent notamment sur l'évolution du risque en fonction du temps écoulé depuis l'exposition ainsi que sur l'influence de l'âge à l'exposition. Les études sur les mineurs ont ainsi montré que le risque diminue avec le délai depuis l'exposition.

Cet argument est important dans l'éducation de la gestion de ce risque. Plus on intervient tôt pour diminuer la concentration de radon dans un habitat, plus le risque imputable à cette exposition passée diminue (figure 1).

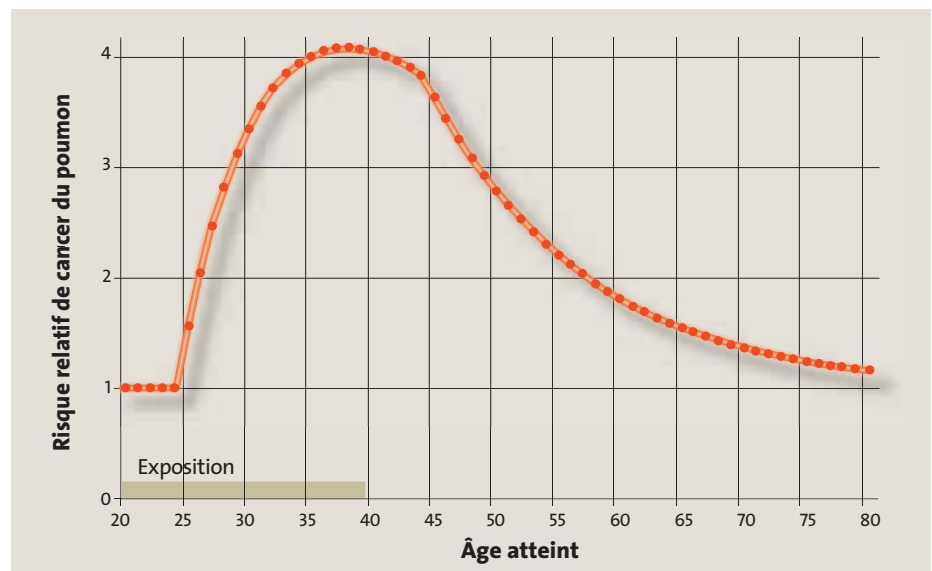


Fig. 1 : Scénario réalisé d'après les résultats du suivi des mineurs d'uranium ; études menées dans le cadre des 5^{ème} et 6^{ème} PCRD (programme de recherche européen « alpha-risk »). Il s'agit du cas d'un mineur exposé à partir de l'âge de 20 ans à 2 WLM (unité d'exposition « mine » équivalente à 460 Bq par m³ dans l'habitat) par an pendant 20 ans. Le risque commence à augmenter après un temps de latence de 5 ans, atteint un maximum à l'âge de 40 ans, puis commence à diminuer au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la période d'exposition.

Fig. 1: A scenario based on results of the follow-up of uranium miners; the studies were conducted as part of the EU's 5th and 6th Framework R&D Programmes (the European "alpha-risk" research programme). Here is considered a miner exposed each year to 2 WLM (the unit of exposure used in mining, equivalent to 460 Bq per cu. m in dwellings) over a 20-year period. The risk begins to increase after a five-year latency interval, peaking at age 40, and subsequently decreasing as the distance from the exposure period increases.

L'ensemble des résultats de ces études épidémiologiques apporte donc des éléments complémentaires qui peuvent être utilisés dans le cadre d'une évaluation du risque lié à l'exposition domestique au radon en France. Une thèse de doctorat, réalisée récemment au laboratoire d'épidémiologie de l'IRSN, a étudié la méthodologie et les incertitudes liées à cette évaluation. Il en ressort qu'entre 5 et 13 % des décès par cancer du poumon en France seraient attribuables à l'exposition domestique au radon (figure 2).

Tous ces résultats devraient sensibiliser les personnes vivant actuellement dans des habitations à concentration élevée de radon. En effet, bien qu'il ne soit pas possible de supprimer tout le radon de nos habitations, des techniques simples à mettre en œuvre existent pour fortement diminuer les niveaux de concentration. Une ventilation adaptée à chaque situation est le meilleur moyen pour agir sur cette concentration dans l'air de nos habitations.

En conclusion, nous considérons que l'ensemble des études épidémiologiques et expérimentales menées durant ces vingt dernières années ont permis de mieux comprendre comment le radon et ses descendants peuvent interagir avec d'autres polluants au niveau pulmonaire. L'interaction entre le radon et le tabac semble être bien plus qu'une simple addition des deux risques considérés séparément. Un important projet de recherche, appelé « alpha-risk », coordonné par le laboratoire d'épidémiologie de l'IRSN, est actuellement en cours au niveau européen. Il vise notamment à mieux comprendre comment interagissent ces deux facteurs cancérigènes et à établir un consensus scientifique international pour une meilleure politique de gestion de ce risque (voir site <http://www.alpha-risk.org>).

Bibliographie récente : O. Catelinois, A. Rogel *et al.* (2006) – Lung cancer attributable to indoor radon exposure in France: impact of the risk models and uncertainty analysis. *Environ. Health Perspect.*, 114(9): 1361-6. R.W. Field, D. Krewski *et al.* (2006) – An overview of the North American residential radon and lung cancer case-control studies. *J. Toxicol. Environ. Health, A* 69(7): 599-631. D. Krewski, J.H. Lubin *et al.* (2006) – A combined analysis of North American case-control studies of residential radon and lung cancer. *J. Toxicol. Environ. Health, A* 69(7): 533-97. S. Darby, D. Hill *et al.* – Residential radon and lung cancer—detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7,148 persons with lung cancer and 14,208 persons without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe. *Scan J. Work. Environ. Health*, 32, suppl.1: 1-84. S. Darby, D. Hill *et al.* (2005) – Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ* 330(7485): 223. H. Baysson, M. Tirmarche *et al.* (2005) – Indoor radon exposure and lung cancer risk. Results of an epidemiological study carried out in France. *Rev. Mal. Respir.*, 22(4): 587-94.

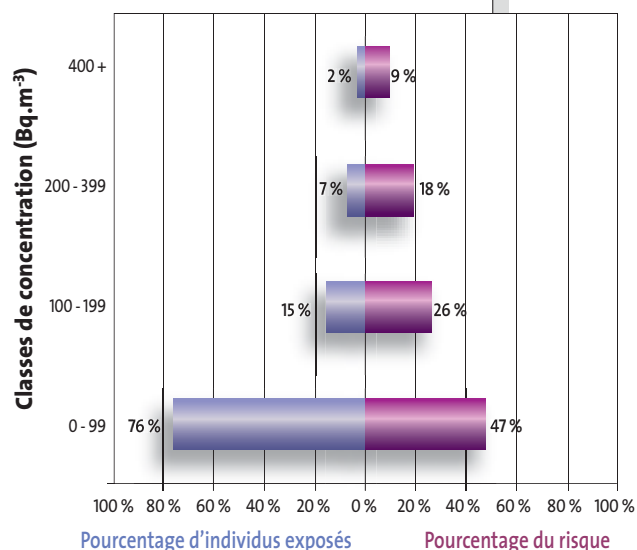


Fig. 2 : Evaluation du risque de décès par cancer du poumon associé à l'exposition au radon en France.
 • Sur 25 134 décès par cancer du poumon en France (Inserm, 1999), entre 4,9 % (II à 90 % : 2,4 – 8,6) et 13,3 % (II à 90 % : 12,1 – 14,6) pourraient être attribuables à l'exposition au radon dans l'habitat, sans pour autant en être la cause unique.

- 27 % des décès attribuables au radon seraient dus à des concentrations > 200 Bq.m⁻³.
- Si l'on prend en compte l'interaction tabac-radon et le pourcentage de fumeurs en France :
 - 75 % des cas attribuables au radon seraient des fumeurs.
 - 25 % des cas attribuables au radon seraient des non-fumeurs.

(II = intervalle d'incertitude autour des coefficients de risque et de la variabilité du radon)

Source : Thèse doctorat O. Catelinois, Environ. Health Perspect. 114(9): 1361-6, 2006.

Fig. 2: Assessment of lung-cancer mortality risk in France related to exposure to domestic radon.

- Out of 25,134 deaths from lung cancer in France (Inserm, 1999), between 4.9% (II at 90%: 2.4–8.6) and 13.3% (II at 90%: 12.1–14.6) might be ascribed to exposure to radon in the home, without necessarily being the sole cause.
- 27% of deaths ascribable to radon would apparently involve concentrations in excess of 200 Bq.m⁻³.
- If we factor in the interaction between tobacco and radon and the percentage of smokers in France:
 - 75% of the cases ascribable to radon would be smokers.
 - 25% of the cases ascribable to radon would be non-smokers.

(II = the uncertainty interval concerning the risk coefficients and variability of radon)

Source : Doctoral thesis O. Catelinois, Environ. Health Perspect. 114(9): 1361-6, 2006.



Radon in buildings

Radon, a radioactive gas given off mainly by the ground, may occur at higher concentrations inside buildings than outdoors due to a confinement effect. The health risks linked to radon exposure are now identified. Awareness of the problem has only emerged relatively recently in France.

A preliminary regulatory framework has been drawn up for sites open to the public (i.e. schools, health-care and social institutions with accommodation facilities, hydropathic establishments and prisons) in 31 French Departments considered high priority, and work is in progress in the framework of an interministerial consultation programme to define an approach for new buildings and for existing housing. Radon measurement in buildings initially relies on passive dosimeters that ensure detection in the building. This approach is standardized. A range of radon-mitigation techniques exists that may be matched with the structure's type and use. Adapting these techniques to new structures has the advantage of integrating them from the design stage on. This will improve effectiveness at marginal cost. In existing buildings, the means that should be implemented to combat the presence of radon in the inside air should be considered on the basis of mean annual concentration levels measured in the building and of this latter's characteristics.