

15 mai 2007 / n° 18-19

Numéro thématique - Impact sanitaire du radon domestique : de la connaissance à l'action

Special issue - Health impact of radon: from knowledge to action

p.145 **Éditorial - Radon et cancer du poumon : appel à une politique de santé publique**

Editorial - Radon and lung cancer: call for public health policy

p.146 **Risques associés au radon : l'apport des études de mineurs / Radon-associated risks: contribution from miner studies**

p.149 **Exposition au radon dans les habitations et risque de cancer du poumon : analyse conjointe des données individuelles de 13 études cas-témoins européennes / Radon in homes and risk of lung cancer: 13 collaborative analyses of individual data from European case-control studies**

p.155 **Évaluation de l'impact sanitaire de l'exposition domestique au radon en France / Assessment of the health impact related to indoor exposure to radon in France**

p.158 **Caractérisation des risques radon dans les régions : faire s'approprier par les acteurs un problème de santé publique méconnu / Characterisation of radon risks in regions: Making stakeholders aware of an underestimated public health issue**

p.163 **Le contrôle des expositions au radon, France, Décembre 2006 / Controlling exposure to radon, France, December 2006**

p.165 **La politique de gestion du radon au Québec / Radon gas management policy in Quebec**

Coordination scientifique du numéro / *Scientific coordination of the issue*: Philippe Pirard, département santé environnement, Institut de veille sanitaire, Saint-Maurice, France - Co-coordination : Olivier Catelinois, Institut de veille sanitaire, Saint-Maurice, France

Éditorial

Radon et cancer du poumon : appel à une politique de santé publique *Radon and lung cancer: call for public health policy*

Hajo Zeeb, Professeur d'Épidémiologie, Institut de statistique médicale, d'épidémiologie et d'informatique, Université de Mainz, Allemagne

Zhanat Carr, Chercheur, Organisation mondiale de la santé, Unité « Rayonnements ionisants et santé environnementale », Genève, Suisse

Le radon – gaz radioactif contenu dans le sol et la roche partout à travers le monde – n'est aucunement perçu par nos sens, mais nous devrions néanmoins nous en préoccuper sérieusement. En effet, l'exposition au radon est un des facteurs de risque majeurs en santé environnementale et ce gaz est impliqué de manière significative dans la survenue d'une maladie particulièrement fréquente et grave : le cancer du poumon. Si le radon est à l'origine de décès chez les mineurs depuis des siècles, il est aujourd'hui reconnu qu'il représente un risque même aux concentrations présentes habituellement dans les habitations. Heureusement, la publication de travaux de recherche épidémiologique qui le montrent coïncide avec une disponibilité grandissante des informations sur la faisabilité et le coût/efficacité des mesures de prévention et de réduction des concentrations en radon. Ce numéro du BEH propose une revue actuelle des aspects scientifiques et politiques en matière de radon en France et ailleurs.

Comme cela a déjà été mentionné, l'association entre l'exposition au radon et le cancer du poumon a été démontrée en premier lieu par des études menées sur de grandes cohortes de mineurs exposés sous terre à de fortes concentrations en radon. L'article de Laurier et coll. décrit les études sur les mineurs et le travail réalisé actuellement sur l'analyse conjointe de grandes séries de données. L'étude de la cohorte de mineurs d'uranium français est particulièrement importante dans ce contexte car elle permet de disposer de données à long terme et d'un suivi dosimétrique de qualité. Laurier et coll. soulignent aussi la nécessité de travaux complémentaires pour étudier l'hypothèse que le radon puisse être associé à des risques autres que le cancer du poumon, en particulier concernant le risque de leucémie. Des résultats d'études faites chez les mineurs même s'ils peuvent faire l'objet de critiques et la publication récente par un groupe français d'une analyse écologique sur les leucémies infantiles et le radon domestique ont amené un regain d'intérêt pour ce sujet.

L'exposition au radon domestique et le risque de cancer du poumon est le thème développé dans l'article de Darby et coll. L'analyse conjointe des données d'études cas-témoins conduites dans 13 pays, incluant la France, a généré les résultats les plus précis actuellement disponibles sur le risque de cancer du poumon suite à une exposition au radon. La conclusion principale de cette étude est l'augmentation linéaire du

risque de cancer du poumon de 16 % pour un accroissement de 100 Bq/m³ de la concentration en radon après prise en compte des incertitudes aléatoires sur les mesures de radon. Si l'on considère le nombre absolu de cas de cancer du poumon associés au radon, on observe qu'une grande part du risque est concentrée chez les fumeurs, et parmi ceux exposés à des concentrations relativement faibles dans leurs habitations.

Quelles sont les conséquences de cette évaluation du risque en France ? D'après les mesures disponibles, la France détient, en effet, une concentration moyenne en radon relativement élevée à environ 90 Bq/m³. En employant divers modèles de risque et en intégrant les incertitudes, Catelinois et coll. ont évalué le nombre de décès annuels par cancer du poumon attribuables au radon en France. Ce chiffre est loin d'être négligeable, et l'étude fait état de plus de 1 200 décès sur l'ensemble du territoire, même lorsque le modèle le plus modéré est appliqué.

Néanmoins, Pirard et coll. soulignent que la persistance des discussions quant au radon relèvent d'un problème de perception du risque par le public. Ils présentent et discutent le risque par région et l'évaluation de son impact sous la perspective d'un outil d'aide aux politiques et aux stratégies de gestion de la santé publique. Cette approche est illustrée par deux études réalisées en Corse et en Bretagne, régions où les concentrations moyennes en radon sont élevées. Les auteurs soulignent le besoin de réaliser des mesures représentatives qui serviront de référence pour établir les actions de santé publique concernant le radon. Cependant, l'absence de ces données ne doit pas empêcher la mise en place de politiques raisonnables fondées sur des approches préventives, comme par exemple l'installation de barrières anti-radon dans les habitations en construction.

Comment coordonner et mettre en oeuvre de manière efficace les actions en matière de gestion du risque lié au radon ? Le travail de Godet et coll. décrit l'approche employée en France qui s'achève par un plan interministériel pour rassembler les différentes agences nationales et les instituts concernés afin de renforcer leurs actions. Les mesures de radon ont démontré qu'un nombre non négligeable de lieux publics présentent une concentration en radon élevée et nécessitent la mise en place d'actions correctives.

Pour conclure, le numéro jette un oeil de l'autre côté de l'Atlantique où le Québec au Canada offre un exemple intéressant quant au problème posé par le radon. En 2004, le rapport d'un groupe de travail a clairement recommandé une intensification des actions correctives pour réduire les risques liés au radon, en insistant sur l'intégration de mesures préventives dans le code de la construction et de l'habitation pour les bâtiments neufs et sur l'évaluation des concentrations en radon dans les bâtiments publics. Dans ce contexte de discussions soutenues autour du problème du radon domestique au Canada, il est bon à savoir que ce pays est actuellement en train de diminuer son niveau de référence pour le radon de 800 à 200 Bq/m³.

Tout au long de ce numéro du BEH, un message transparaît en fil conducteur : une action efficace pour réduire les risques de santé liés au radon ne deviendra envisageable que lorsque notre responsabilité face à ce risque environnemental sera comprise et partagée par les scientifiques, les hommes politiques et le grand public. Aujourd'hui, la science a pu démontrer de manière convaincante l'existence d'une association entre le cancer du poumon et l'exposition au radon. Ainsi, le défi est maintenant de communiquer ces informations à tous les acteurs et d'aider les décideurs à la réaliser des actions pertinentes à tous les niveaux. Une partie de ce défi est liée au « grand frère » du radon en ce qui concerne le risque de cancer du poumon, à savoir le tabagisme, qui est à l'origine de la grande majorité des cancers du poumon à travers le monde. Cependant, comme cela a largement été démontré par la communauté scientifique, le fait de minimiser le risque lié au radon constituerait un acte de négligence. Il est clair que les mesures préventives et les actions correctives contre le radon doivent être menées de front avec la lutte contre le tabagisme afin d'obtenir les meilleurs résultats en matière de santé publique. L'importance du risque environnemental lié au radon a été reconnue sur le plan international : l'Organisation mondiale de la santé a lancé en 2005 le Projet international sur le radon dans le but de développer et renforcer les politiques de contrôle du radon dans le monde entier (voir http://www.who.int/ionizing_radiation/env/radon/en/index.html). Dès son lancement, ce projet a bénéficié de l'expertise technique apportée par des collaborateurs français. Cette collaboration doit naturellement se penser en termes d'échanges mutuels et l'OMS est prête à soutenir la promotion du programme français sur le radon et ses actions de communication dans les années à venir.

Une version anglaise de cet éditorial est disponible sur le site internet de l'InVS : http://www.invs.sante.fr/display/?doc=beh/2007/18_19/index.htm
An english version of this editorial is available on the web site of the French Institute of Public health Surveillance:
http://www.invs.sante.fr/display/?doc=beh/2007/18_19/index.htm

Risques associés au radon : l'apport des études de mineurs

Dominique Laurier (dominique.laurier@irsn.fr)¹, Blandine Vacquier¹, Kleirvi Leuraud¹, Sylvaine Caër², Alain Acker², Margot Tirmarche¹

1 / Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, Fontenay-aux-Roses, France 2 / Conseil médical Groupe Areva, Paris, France

Résumé / Abstract

Cet article présente les études épidémiologiques effectuées sur des populations de mineurs pour analyser les risques associés à l'exposition au radon. Il recense les données disponibles, en détaillant plus particulièrement l'étude française. Il résume les résultats acquis et présente les questions actuelles. Au total, une quinzaine d'études de cohorte ont été mises en place dans le monde depuis les années 1960, notamment sur des mineurs d'uranium. Ces études ont apporté de nombreux résultats sur le risque de cancer du poumon. Elles ont en particulier permis de quantifier la relation exposition-réponse et de mettre en évidence l'effet de facteurs modifiants de cette relation, tels que l'âge ou le délai depuis l'exposition. Aujourd'hui,

Radon-associated risks: contribution from miners studies

This article presents epidemiological studies conducted among populations of miners to analyse the risks associated to radon exposure. It reviews the available data, and details the characteristics of the French cohort of miners. It summarises the obtained results and introduces the current research issues. In all, around fifteen cohort studies on miners, mainly uranium miners, have been performed in the world since the 1960's to analyse the risks associated to radon exposure. These studies have provided many results on the risk of lung cancer. More specifically, they allowed to quantify the exposure-risk

la qualité des données dosimétriques individuelles et la possibilité de reconstituer l'ensemble de leur historique professionnel font des études de mineurs un complément important aux études conduites en population générale. Les projets de recherche en cours, en particulier au niveau européen, permettront de prendre en compte les expositions multiples présentes dans les mines et d'analyser les risques pour d'autres causes de décès que le cancer du poumon.

relationship, and to demonstrate the importance of modifying factors of this relationship, such as age and time since exposure. Today, the quality of individual dosimetric data and the possibility to reconstruct the miners professional history make these studies a considerably important tool to complement surveys performed in the general population. Ongoing research projects, at the European level in particular, will allow to consider the multiple exposures existing in mines, and to analyse the risks for causes of death other than lung cancer.

Mots clés / Key words

Radon, mineurs, épidémiologie, cancer du poumon, leucémie / Radon, miners, epidemiology, lung cancer, leukaemia

Introduction

Le radon est un gaz radioactif naturellement présent à la surface de la Terre en concentration variable, dépendant de la nature du sol et du degré de confinement des lieux. Des concentrations particulièrement élevées peuvent être rencontrées dans les mines de minerai (étain, uranium, fer). C'est pourquoi des études épidémiologiques sur des populations de mineurs ont été mises en place dès les années 1960 afin d'analyser les risques associés à l'inhalation de radon et de ses descendants radioactifs. Le présent article recense les données aujourd'hui disponibles, en détaillant en particulier les caractéristiques de l'étude française des mineurs d'uranium. Il résume les résultats acquis, en présentant les avantages de ceux-ci et leur complémentarité par rapport à ceux issus des études effectuées en population générale.

Données disponibles

Au total, une quinzaine d'études de cohorte ont été effectuées à travers le monde. Le tableau 1 présente les caractéristiques principales de l'ensemble des données actuellement disponibles. Plusieurs critères vont déterminer l'intérêt de chacune des études pour quantifier l'association entre l'exposition au radon et les risques à long terme, en particulier la taille de la population, la qualité du suivi, la précision des estimations d'exposition ou la possibilité de contrôler l'effet éventuel de facteurs confondants...

Un intérêt majeur des études de mineurs est de disposer de données individuelles sur l'exposition professionnelle au radon. L'unité d'exposition utilisée dans les mines est le « *Working Level Month* » (WLM), correspondant au produit de la concentration de radon par la durée de travail. Un WLM est égal à $3,5 \text{ mJ.h.m}^{-3}$. La reconstitution de ces expositions au radon repose généralement sur des mesures d'ambiance effectuées dans les mines et sa qualité varie sensiblement selon les études. Durant les 10 dernières années, les travaux effectués sur certaines cohortes ont amélioré la qualité des données, en particulier pour ce qui est de l'historique des expositions professionnelles au radon, mais aussi à d'autres polluants tels que les rayonnements gamma, les poussières de minerai d'uranium ou la silice.

Des différences apparaissent également entre les études pour ce qui est de la qualité du suivi des individus et de la détermination des causes de décès, reflétée respectivement par les critères du

pourcentage d'individus perdus de vue et du pourcentage de causes de décès manquantes. La durée de suivi est également un élément particulièrement important pour analyser l'expression du risque au cours de la vie et l'effet modifiant éventuel de l'âge. La taille des cohortes constitue souvent une limite importante pour l'analyse de risques faibles. Pour contourner cette limite, des analyses conjointes des données de plusieurs études peuvent être mises en place une fois que certains critères de compatibilité ont été vérifiés. Une analyse conjointe a été effectuée à la fin des années 1990 incluant l'ensemble des études comportant des données d'exposition individuelles au radon et permettant l'analyse de la relation exposition-risque. Cette analyse réunit 11 cohortes, et porte au total sur plus de 60 000 mineurs [1,2]. Un nouveau projet d'étude conjointe est en cours au niveau européen, axé sur des populations de mineurs ayant reçu des expositions faibles sur de longues durées et disposant de données de dosimétrie de qualité [3,4].

Cohorte française des mineurs d'uranium

La cohorte française des mineurs d'uranium est conduite en collaboration entre l'IRSN et AREVA NC (ex-Cogema) depuis plus de 20 ans [5]. Elle comporte aujourd'hui 5 086 mineurs qui ont été

employés au moins un an dans le groupe CEA-Cogema depuis 1946. L'exposition annuelle au radon et à ses descendants radioactifs a été enregistrée pour chaque mineur. Le suivi de la mortalité a été complété jusqu'en 1999 et la durée moyenne de suivi est aujourd'hui de plus de 30 ans. Le pourcentage d'individus perdus de vue est faible (<2%). Par rapport aux autres études de mineurs, la cohorte française présente une des plus longues durées de suivi et repose sur une dosimétrie de très bonne qualité, en particulier pour les années après 1956. Au total, 1 467 décès ont été enregistrés au sein de cette cohorte, dont 159 par cancer du poumon.

L'analyse ne montre pas d'excès de mortalité toutes causes. En revanche, un risque élevé de décès a été observé pour le cancer du poumon, le cancer du rein et la silicose [6]. L'analyse confirme l'existence d'une augmentation du risque de cancer du poumon avec l'exposition cumulée au radon, avec un excès de risque relatif de l'ordre de 0,6 à 0,9 pour 100 WLM [7,8]. Un effort particulier fourni durant ces dernières années a permis de reconstituer la consommation de tabac d'un sous-ensemble des mineurs dans le cadre d'une étude cas-témoins nichée. L'analyse de ces données montre que cette relation persiste après prise en compte du tabagisme [9]. Les recherches se poursuivent dans le

Tableau 1 Caractéristiques des études de cohortes de mineurs disponibles en 2006
Table 1 Characteristics of miners cohort studies available in 2006

| Nom-localisation | Pays | Type | Nombre de mineurs | Période de suivi | Durée de suivi (années) | Nombre d'années de suivi | Décès par cancer du poumon |
|------------------|-----------------|--------------|-------------------|------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Yunnan | Chine | Etain | 13 649 | 1976-87 | 10 | 134 842 | 936 |
| West-Bohemia | Répub. Tchèque | Uranium | 9 979 | 1952-99 | 26 | 262 507 | 922 |
| Colorado | USA | Uranium | 3 347 | 1950-90 | 26 | 79 556 | 334 |
| Ontario | Canada | Uranium | 21 346 | 1955-86 | 18 | 300 608 | 285 |
| Newfoundland | Canada | Fluorapatite | 1 742 | 1950-01 | 34 | 59 597 | 191 |
| Malmberget | Suède | Fer | 5 487 | – | 26 | 32 452 | 79 |
| New Mexico | USA | Uranium | 3 457 | 1943-85 | 17 | 46 800 | 68 |
| Eldorado * | Canada | Uranium | 17 660 | 1950-99 | 23 | 408 477 | 639 |
| Radium Hill | Australie | Uranium | 1 457 | 1948-87 | 22 | 24 138 | 31 |
| Cea-Cogema | France | Uranium | 5 086 | 1946-99 | 30 | 153 063 | 159 |
| Cornwall | Grande Bretagne | Etain | 2 535 | 1941-89 | 26 | 66 920 | – |
| Wismut | Allemagne | Uranium | 59 001 | 1946-98 | 30 | 1 801 630 | 2 388 |
| North-Bohemia | Répub. Tchèque | Etain | 2 466 | 1953-99 | 27 | 66 418 | 205 |
| Hunan | Chine | Uranium | 5 285 | 1970-01 | 29 | 155 440 | 123 |
| Yellow River | Russie | Uranium | 2 582 | 1943-84 | 28 | 73 000 | 101 |
| Total | | | 155 079 | | | > 3 633 196 | > 6 382 |

* Cohorte issue du regroupement de cohortes initialement séparées (Beaverlodge, Port Radium...)

cadre d'un projet de recherche européen regroupant plus de 50 000 mineurs suivis sur plusieurs dizaines d'années et pour lesquels une reconstitution précise des expositions professionnelles a été effectuée [3,4]. Les prochaines analyses permettront de prendre en compte les informations recueillies sur les autres expositions présentes dans les mines [4] (www.alpha-risk.org).

Résultats acquis : exposition au radon et risque de cancer du poumon

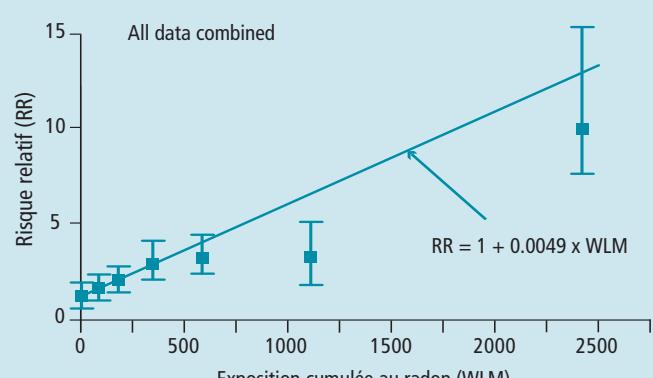
Les études épidémiologiques effectuées sur des populations de mineurs montrent de façon concordante un excès de mortalité par cancer du poumon et une augmentation du risque de décès par cancer du poumon associée à l'exposition cumulée au radon durant la vie professionnelle. Cette relation est compatible avec un modèle linéaire (figure 1). La relation estimée chez les mineurs apparaît tout à fait cohérente avec celle obtenue dans le cadre des études menées en population générale sur le risque de cancer du poumon et l'inhalation du radon dans les habitations (figure 2).

Plusieurs auteurs ont mis en évidence des facteurs modifiants de cette relation : le risque associé à une exposition donnée diminue avec l'augmentation de l'âge lors de cette exposition et avec le délai depuis cette exposition [2]. Ces résultats sont illustrés par la figure 3, sur la base des résultats d'une analyse franco-tchèque, reposant sur plus de 10 000 mineurs : après la fin de l'exposition au radon, le risque associé à cette exposition diminue d'un facteur 2 par décennie, et 30 ans après la fin de l'exposition, il redevient très proche du risque d'un individu non exposé. Le délai de latence moyen estimé entre l'exposition au radon et à ses descendants radioactifs et la survenue des décès est de l'ordre de 20 à 25 ans.

L'analyse conjointe des 11 cohortes avait montré un effet inverse du débit d'exposition : pour une même exposition cumulée, le risque associé était plus élevé si cette exposition était reçue sur une longue durée. Néanmoins, cet effet n'est pas retrouvé lorsque l'analyse exclut les expositions plus élevées [2,3].

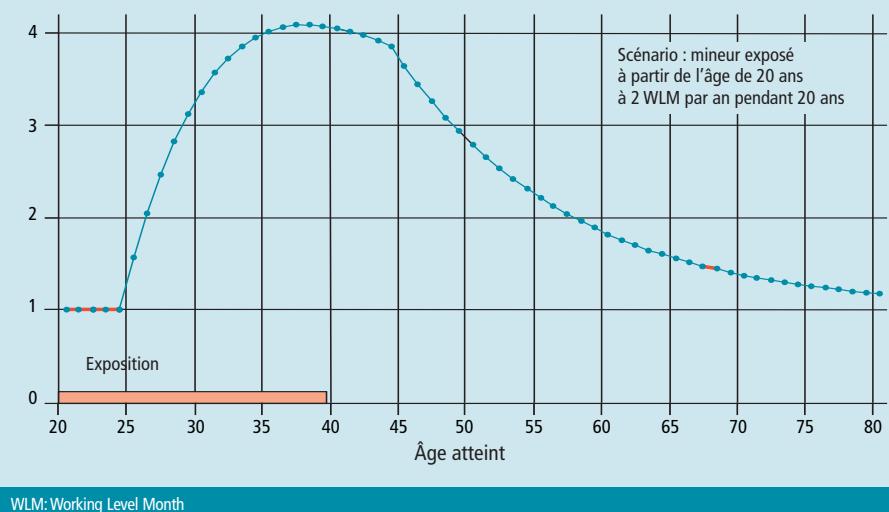
Figure 1 Relation entre le risque de décès par cancer du poumon et l'exposition cumulée au radon chez les mineurs d'uranium [1]

Figure 1 Relationship between cumulated radon exposure and lung cancer mortality risk among miners [1]



WLM: Working Level Month

Figure 3 Facteurs modifiants de la relation entre l'exposition cumulée au radon et le risque de décès par cancer du poumon chez les mineurs d'uranium : effet de l'âge et du délai depuis l'exposition (étude conjointe franco-tchèque [3]) / Figure 3 Modifying factors of the relationship between cumulated radon exposure and lung cancer mortality risk among uranium miners: effects of age and time since exposure (joint French-Czech analysis [3])



Certaines études ont permis, au moins partiellement, de reconstituer le statut tabagique des mineurs. Les résultats actuels indiquent une interaction sub-multiplicative entre le tabac et le radon pour ce qui est du risque de cancer du poumon [2].

Question ouverte : exposition au radon et risque de leucémie

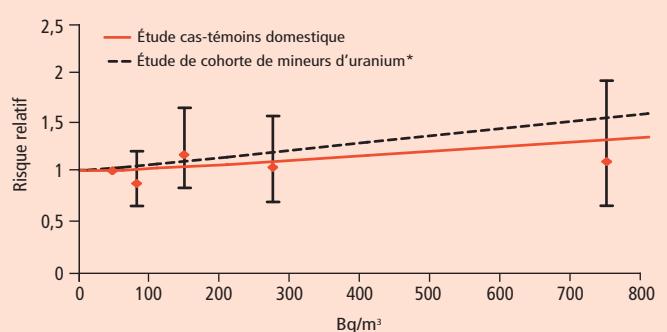
Le seul effet actuellement reconnu de l'inhalation de radon est l'induction de cancer du poumon [10]. Néanmoins, des études dosimétriques indiquent qu'une part de la dose due au radon et à ses descendants radioactifs peut être délivrée en dehors des poumons, en particulier à la moelle osseuse [11]. De plus, une association entre la concentration de radon dans l'habitat et le risque de leucémie est régulièrement retrouvée dans les études écologiques en population générale [12,13].

Les études effectuées chez les mineurs jusqu'à la fin des années 90 n'avaient pas conclu à une association entre l'exposition au radon et le risque de leucémie [14]. Cependant plusieurs travaux récents

apportent de nouveaux éléments sur ce point. Une étude cas-témoins chez des mineurs d'uranium allemands ne montre pas d'association entre l'exposition au radon et le risque de leucémie [15]. Une analyse de la cohorte des mineurs d'uranium tchèques indique un excès de décès par leucémie, associé à la durée d'exposition et à la dose à la moelle osseuse. Néanmoins, les auteurs attribuent cette association plus à l'exposition externe aux radiations et à l'inhalation de poussières d'uranium présentes dans les mines qu'au radon [16]. Une autre étude, portant sur des données d'incidence chez les mineurs d'uranium tchèques, a conclu à une association entre l'exposition au radon et le risque de leucémie, mais elle ne permettait pas de considérer les autres sources d'exposition présentes dans les mines [17]. En conclusion, l'existence d'un risque de leucémie associé à l'inhalation de radon n'est pas démontrée. Des recherches complémentaires sont nécessaires, en tenant compte de l'ensemble des expositions de ces mineurs, en particulier les différentes sources d'exposition aux rayonnements ionisants.

Figure 2 Comparaison des relations entre l'exposition au radon et le risque de cancer du poumon obtenues en France dans l'étude de cohorte des mineurs d'uranium et dans l'étude cas-témoins en population générale [18]

Figure 2 Lung cancer risk associated to radon exposure: comparison of the relationships obtained in France from the cohort study of uranium miners and from the case-control study among the general population [18]



* En utilisant le facteur de conversion 1 WLM (Working Level Month) = 230 Bq/m^3

Remerciements

Cette étude bénéficie d'un soutien financier de la part d'AREVA-NC et de la Commission Européenne (projet AlphaRisk).

Références

- [1] Lubin J, Boice JD, Edling JC, et al. Radon and lung cancer risk: A joint analysis of 11 underground miner studies. National Institute of Health (NCI), 1994.
- [2] National Research Council. Committee on Health Risks of Exposure to Radon. Board on Radiation Effects Research. Health effects of exposure to radon. BEIR VI report. Washington, D.C.: National Academy Press, 1999.
- [3] Tirmarche M, Laurier D, Bergot D, et al. Quantification of lung cancer risk after low radon exposure and low exposure rate: synthesis from epidemiological and experimental data. Final scientific report, February 2000- July 2003. Contract FIGH-CT1999-00013. Brussels: European Commission DG XII, 2003.
- [4] Alpha-Risk: risks related to internal and external exposures. In Euratom Research Projects and Training Activities (Volume I). ISBN 92-79-00064-0. EUR 21229. Catalogue KI-NA-21229-EN-C. 2006.
- [5] Tirmarche M, Raphalen A, Allin F, Chameaud J, Bredon P. Mortality of a cohort of French uranium miners exposed to relatively low radon concentrations. Br J Cancer 1993; 67:1090-7.
- [6] Vacquier B, Caér S, Quesne B, Tirmarche M, Laurier D. Radon exposure and mortality risk among French miners cohort: extended follow-up 1946-1999. ISEE-ISEA congress. Paris, Sept 2006.
- [7] Rogel A, Laurier D, Tirmarche M, Quesne B. Modelling lung cancer risk associated to radon exposure in the French cohort of uranium miners. J Radiol Prot 2002; 22:A101-6.
- [8] Laurier D, Tirmarche M, Mitton N, et al. An update of cancer mortality among the French cohort of uranium miners: extended follow-up and new source of data for causes of death. Eur J Epidemiol 2004; 19:139-46.
- [9] Leuraud K, Billon S, Bergot D, Tirmarche M, Caér S, Quesne B, Laurier D. Lung cancer risk associated to exposure to radon and smoking in a case-control study of French uranium miners. Health physics 2007; 92:371-8.
- [10] International Agency for Research on Cancer. Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans: Ionizing Radiation, Part II: Some Internally Deposited Radionuclides. Lyon: International Agency for Research on Cancer, 2001.
- [11] Kendall GM, Smith TJ. Doses to organs and tissues from radon and its decay products. J Radiol Prot 2002; 22:389-406.
- [12] Laurier D, Valenty M, Tirmarche M. Radon exposure and the risk of leukemia: a review of epidemiological studies. Health Phys 2001; 81:272-88.
- [13] Evrard AS, Hémon D, Billon S, et al. Ecological association between indoor radon concentration and childhood leukaemia incidence in France, 1990-1998. Eur J Cancer Prev 2005; 14:147-57.
- [14] Darby SC, Whitley E, Howe GR, et al. Radon and cancers other than lung cancer in underground miners: a collaborative analysis of 11 studies. J Natl Cancer Inst 1995; 87:378-84.
- [15] Möhner M, Lindtner M, Otten H, Gille HG. Leukemia and exposure to ionizing radiation among German uranium miners. Am J Ind Med 2006; 49: 238-48.
- [16] Tomasek L, Malatova I. Leukaemia and Lymphoma Among Czech Uranium Miners. Second European International Radiation Protection Association (IRPA) Congress on Radiation Protection. Paris, May 2006.
- [17] Rericha V, Kulich M, Rericha R, Shore DL, Sandler DP. Incidence of leukemia, lymphoma, and multiple myeloma in Czech uranium miners: a case-cohort study. Environ Health Perspect 2006; 114:818-22.
- [18] Baysson H, Tirmarche M, Tyzen G, et al. Indoor Radon and Lung Cancer in France. Epidemiology 2004; 15:709-16.

Exposition au radon dans les habitations et risque de cancer du poumon : analyse conjointe des données individuelles de 13 études cas-témoins européennes

Sarah Darby (sarah.darby@ctsu.ox.ac.uk)¹, David Hill¹, Anni Auvinen², Juan-Miguel Barros-Dios³, Hélène Baysson⁴, Francesco Bochicchio⁵, Harz Deo⁶, Rolf Falk⁷, Francesco Forastiere⁸, Matti Hakama⁹, Iris Heid¹⁰, Lothar Kreienbrock¹¹, Mikaela Kreuzer¹², Frédéric Lagarde¹³, Ilona Mäkeläinen¹⁴, Colin Muirhead¹⁵, Wilhelm Oberaigner¹⁶, Göran Pershagen¹³, Alberto Ruano-Ravina³, Eeva Ruosteenoja¹⁴, Angelika Schaffrath Rosario¹⁰, Margot Tirmarche⁴, Ladislav TomáBek¹⁷, Élise Whitley¹⁸, Heinz-Erich Wichmann¹⁰, Richard Doll¹

1 / Radcliffe Infirmary, Royaume-Uni 2 / École de Santé Publique, Tampere, Finlande 3 / Université de Santiago de Compostela, Espagne 4 / Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire, Fontenay-aux-Roses, France 5 / Institut National Italien de la Santé, Rome, Italie 6 / Université de Reading, Reading, Royaume-Uni 7 / Autorité suédoise de radioprotection, Stockholm 8 / Département d'épidémiologie, Rome, Italie 9 / Registre du cancer finlandais, Helsinki, Finlande 10 / Centre de recherche GSF pour l'Environnement et la Santé, Neuherberg, Allemagne 11 / Institut de Biométrie, d'Épidémiologie et de Traitement de l'Information, Hannovre, Allemagne 12 / Département de Radioprotection et de Santé, Neuherberg, Allemagne 13 / Institut de Médecine Environnementale, Stockholm, Suède 14 / Autorité de Sécurité Nucléaire et de Radioprotection, Helsinki, Finlande 15 / Autorité Nationale de Radioprotection, Chilton, Royaume-Uni 16 / Tumorregister Tirol, Innsbruck, Autriche 17 / Institut National de Radioprotection, Prague, République Tchèque 18 / Université de Bristol, Bristol, Royaume-Uni

Cet article a été publié dans sa version anglaise dans le BMJ consultable sous la référence suivante : BMJ. 2005 Jan 29;330(7485):223-6. (Epub 2004 Dec 21).
This article has been published in the BMJ and is available at: BMJ. 2005 Jan 29;330(7485):223-6. (Epub 2004 Dec 21).

Résumé/Abstract

Objectifs – Déterminer le risque de cancer du poumon associé à l'exposition aux produits de désintégration du radon, gaz d'origine naturelle, dans les habitations.

Conception – Analyse conjointe des données individuelles de 13 études cas-témoins sur le radon domestique et le cancer du poumon.

Contexte – Neuf pays européens.

Effectifs – 7 148 cas de cancer du poumon et 14 208 témoins.

Mesures principales – Les risques relatifs de cancer du poumon et la concentration du gaz radon dans des habitations occupées au cours des 5 à 34 dernières années mesurée en becquerels (nombre de désintégrations de radon par seconde) par mètre cube (Bq/m³) d'air domestique.

Résultats – La concentration moyenne de radon mesurée dans les habitations du groupe témoin était de 97 Bq/m³, dont 11 % était >200 et 4 % était >400 Bq/m³. Dans les habitations des individus atteints de cancer du poumon, la concentration moyenne était de 104 Bq/m³. Le risque de cancer du poumon augmente de 8,4 % (intervalle de confiance à 95 % de 3,0 % à 15,8 %) par accroissement de 100 Bq/m³ de radon mesuré (P=0,0007). Cela correspond à une augmentation de 16 % (5 % à 31 %) par accroissement de 100 Bq/m³ de radon domestique - c'est-à-dire après correction de la dilution induite par les incertitudes aléatoires de la mesure des concentrations en radon. La relation dose/effet semble être linéaire sans seuil minimal et

Radon in homes and risk of lung cancer: 13 collaborative analyses of individual data from European case-control studies

Objective – To determine the risk of lung cancer associated with exposure at home to the radioactive disintegration products of naturally occurring radon gas.

Design – Collaborative analysis of individual data from 13 case-control studies of residential radon and lung cancer.

Setting – Nine European countries.

Subjects – 7 148 cases of lung cancer and 14 208 controls.

Main outcome measures – Relative risks of lung cancer and radon gas concentrations in homes inhabited during the previous 5-34 years measured in becquerels (radon disintegrations per second) per cubic metre (Bq/m³) of household air.

Results – The mean measured radon concentration in homes of people in the control group was 97 Bq/m³, with 11% measuring > 200 and 4% measuring > 400 Bq/m³. For cases of lung cancer the mean concentration was 104 Bq/m³. The risk of lung cancer increased by 8.4% (95% confidence interval 3.0% to 15.8%) per 100 Bq/m³ increase in measured radon (P=0.0007). This corresponds to an increase of 16% (5% to 31%) per

reste significative ($P=0,04$) lorsque l'analyse se limite aux individus occupant des habitations où la concentration en radon est $<200 \text{ Bq/m}^3$. L'excès de risque proportionnel ne varie pas de manière significative en fonction de l'étude, de l'âge, du sexe ou des habitudes tabagiques. En l'absence d'autres causes de décès, les risques absolus de cancer du poumon à l'âge de 75 ans aux concentrations habituelles en radon de 0, 100 et 400 Bq/m^3 sont respectivement d'environ 0,4 %, 0,5 % et 0,7 % pour une personne n'ayant jamais fumé, et environ 25 fois supérieurs (10 %, 12 % et 16 %) pour un fumeur de cigarettes.

Conclusions – L'analyse conjointe, mais pas individuelle, de ces études indique que l'exposition au radon domestique présente un risque significatif, en particulier chez les fumeurs et les anciens fumeurs récents, et démontre qu'il est à l'origine d'environ 2 % de tous les décès attribuables au cancer en Europe.

Mots clés / Key words

Radon, problèmes environnementaux, tabagisme, cancer du poumon / Radon, environmental issues, smoking, lung cancer

Introduction

Dans de nombreux pays, l'exposition domestique aux produits de désintégration radioactifs de courte durée de vie du radon-222, gaz chimiquement inerte, représente approximativement la moitié de l'exposition non médicale totale aux rayonnements ionisants [1]. Le radon-222 est créé naturellement lors de la dégradation de l'uranium-238, présent dans toute la croûte terrestre. Ce gaz possède une demi-vie de quatre jours, ce qui est suffisant pour permettre sa diffusion à travers le sol vers l'air avant sa désintégration par émission d'une particule α en une série de produits de filiation radioactifs de courte durée de vie. Deux de ces derniers, le polonium-218 et le polonium-214, se désintégreront également par émission de particules α . Lorsqu'il est inhalé, le radon lui-même est presque entièrement exhalé immédiatement. Cependant, ses produits de filiation, qui sont solides, se déposent souvent sur l'épithélium bronchique, exposant ainsi les cellules au rayonnement α .

La pollution de l'air par le radon est ubiquitaire. A l'air libre les concentrations sont faibles mais à l'intérieur le gaz peut s'accumuler, en particulier dans les habitations où se produit l'essentiel de l'exposition au radon de la population générale. Les concentrations les plus élevées auxquelles des ouvriers ont été exposés de manière régulière se sont produites sous terre, notamment dans les mines d'uranium. Les études sur les mineurs ayant été exposés au gaz ont toujours montré une association entre le radon et le cancer du poumon. L'extrapolation de ces études suggère que dans de nombreux pays, l'exposition au radon domestique, qui est de plus faible intensité mais qui concerne une population beaucoup plus grande, pourrait être à l'origine d'une minorité significative de tous les cancers du poumon. Cela est important car la concentration en radon d'un bâtiment existant peut le plus souvent être réduite à coût modéré – par exemple, en améliorant la ventilation sous les planchers – pendant que dans les bâtiments neufs des concentrations faibles peuvent être garanties à des prix raisonnables ou réduits – par exemple par

la mise en place d'une barrière anti-radon au niveau du sol. Cependant, ces extrapolations sont fondées sur des suppositions incertaines car les taux d'exposition chez les mineurs associés à un risque avéré sont généralement beaucoup plus élevés et l'exposition ne dure que quelques années dans des conditions différentes dont un fort taux de particules dans l'air [1,3]. De plus, dans ces études sur les mineurs les antécédents sur le tabagisme sont souvent manquants, ou incomplets, et certains mineurs étaient également exposés à d'autres carcinogènes pulmonaires comme l'arsenic.

Plusieurs études ont été menées dans de nombreux pays européens afin d'évaluer le risque de cancer du poumon associé à l'exposition au radon domestique sur plusieurs décennies. Considérées individuellement, ces études ne sont pas assez étendues pour évaluer les risques modérés de façon fiable. La puissance statistique peut être augmentée en combinant les données de plusieurs études, cependant cela ne peut pas se réaliser de manière satisfaisante à partir des données publiées. Les concentrations en radon sont en général plus faibles dans les zones urbaines que dans les zones rurales parce que dans le premier cas la roche sous-jacente est le plus souvent sédimentaire et plus de personnes habitent à l'étage dans des appartements. Les zones urbaines ont également le plus souvent une prévalence plus élevée pour le tabagisme. Il s'ensuit donc que la concentration en radon dans les habitations est souvent corrélée négativement avec le tabagisme [4,6] et une cohorte plus grande est nécessaire afin de corriger cet effet de manière fiable. Nous avons donc collecté et réanalysé les données de chaque individu de toutes les études européennes sur l'exposition au radon domestique et le cancer du poumon qui répondent à certaines critères.

Méthodes

Critères d'inclusion des études

Cette collaboration a été menée sur les 13 études européennes ayant inclus plus de 150 patients atteints du cancer du poumon et 150 témoins, avec

100 Bq/m³ increase in usual radon – that is, after correction for the dilution caused by random uncertainties in measuring radon concentrations. The dose-response relation seemed to be linear with no threshold and remained significant ($P = 0.04$) in analyses limited to individuals from homes with measured radon $< 200 \text{ Bq/m}^3$. The proportionate excess risk did not differ significantly with study, age, sex, or smoking. In the absence of other causes of death, the absolute risks of lung cancer by age 75 years at usual radon concentrations of 0, 100, and 400 Bq/m^3 would be about 0.4%, 0.5%, and 0.7%, respectively, for lifelong non-smokers, and about 25 times greater (10%, 12%, and 16%) for cigarette smokers.

Conclusions – Collectively, though not separately, these studies show appreciable hazards from residential radon, particularly for smokers and recent ex-smokers, and indicate that it is responsible for about 2% of all deaths from cancer in Europe.

des antécédents détaillés au niveau du tabagisme, et des mesures des concentrations en radon dans les habitations occupées par ces individus sur au moins les 15 dernières années. Les données sur les variables démographiques et le mode de vie ont été compilées pour chaque individu en utilisant un format commun, et les mesures du radon ont été exprimées en becquerels (Bq) (désintégrations de radon par seconde) par mètre cube d'air domestique. Sur la base des données recueillies au cours des études sur les mineurs [23], nous avons estimé que la période d'exposition au radon la plus en rapport avec le risque de cancer du poumon s'étendait sur la période de 30 ans se terminant 5 ans avant le diagnostic (ou le décès) de cancer du poumon ou, pour le groupe témoin, avant une date de référence correspondante. Nous avons exclu les individus pour lesquels les mesures de radon n'étaient pas disponibles pendant cette période de 30 ans, ou ayant des habitudes tabagiques non-dокументées. Les mesures de radon disponibles couvraient une période moyenne de 23 ans. Pour les habitations pour lesquelles des mesures de radon ne pouvaient être obtenues (par exemple si la maison avait été détruite), nous avons établi la concentration indirectement comme la moyenne de toutes les mesures de radon dans les maisons des membres du groupe témoin dans une zone d'étude appropriée. Enfin, pour déterminer la « concentration en radon mesurée » pour chaque individu, nous avons calculé une moyenne des concentrations en radon pondérée en fonction du temps pour toutes les habitations occupées au cours de dernières 5-34 années, avec des « poids » proportionnels au temps passé dans chaque habitation.

Méthodes statistiques

Nous avons évalué l'association entre l'exposition au radon et le cancer du poumon en utilisant deux méthodes. D'abord, un modèle a été adapté dans lequel le risque de cancer du poumon était proportionnel à $(1+\alpha x)$ où x est la concentration en radon mesurée et α est l'accroissement proportionnel du risque par unité d'accroissement du radon mesuré.

Deuxièmement, nous avons réparti les cas et les témoins par catégorie de concentration en radon mesurée et nous avons tracé les risques relatifs des différentes catégories en fonction des niveaux d'exposition moyens estimés pour chaque catégorie. Pour chaque type d'analyse, la confusion était contrôlée par stratification.

Les mesures de radon réalisées dans une même habitation à quelques années d'intervalle montrent une variabilité aléatoire considérable, ce qui indique qu'il existe un certain degré d'incertitude dans la concentration en radon mesurée pour chaque individu. Une incertitude aléatoire supplémentaire s'y rajoute car la concentration en radon n'a pas pu être mesurée dans certaines habitations et a été estimée de manière indirecte. Ces deux types d'incertitude induisent une « dilution de la régression » par laquelle la relation du risque à la concentration en radon mesurée est significativement plus faible que la relation du risque à la concentration « habituelle » (c'est-à-dire la vraie moyenne à long terme) [5,6,8]. Nous avons calculé la relation dose/effet avec et sans correction pour cela et nous avons estimé une concentration moyenne en radon « habituelle » pondérée en fonction du temps pour chaque individu (cf. www.ctsu.ox.ac.uk/radonmethods pour des informations complémentaires).

Résultats

Notre analyse a inclus 7 148 individus atteints d'un cancer du poumon et 14 208 témoins. Pour les individus atteints d'un cancer du poumon la concentration moyenne en radon mesurée était de 104 Bq/m³ alors que pour les témoins, la moyenne pondérée des moyennes spécifiques à l'étude, avec des poids proportionnels au nombre de cas de cancer du poumon, était de 97 Bq/m³ (tableau 1). Parmi les témoins, le pourcentage d'individus n'ayant jamais fumé augmente avec l'accroissement de la concentration en radon (pourcentages de 39 %, 40 %, 41 %, 46 %, et 48 % pour des

concentrations en radon mesurées < 100, 100-199, 200-399, 400-799, et ≥ 800 Bq/m³ après stratification par étude, âge, sexe et zone géographique ; $P = 0,001$ pour la tendance).

Risque de cancer du poumon en fonction de la concentration en radon mesurée

Après une stratification par l'étude, l'âge, le sexe, la zone géographique et le tabagisme, le risque de cancer du poumon augmente de 8,4 % (intervalle de confiance à 95 % de 3,0 % à 15,8 % ; $P = 0,0007$) pour chaque accroissement de 100 Bq/m³ de la concentration en radon mesurée. La stratification pour le tabagisme a été réalisée d'abord en répartissant les individus dans sept catégories (personne n'ayant jamais fumé, fumeurs actuels de < 15, 15-24, ou ≥ 25 cigarettes par jour, anciens fumeurs depuis < 10 années ou ≥ 10 années, et autres) et ensuite en divisant encore chaque groupe de fumeurs actuels par l'âge auquel ils ont commencé à fumer (< 15, 15-17, 18-20, ou ≥ 21 ans ou inconnu) et chaque groupe d'anciens fumeurs par le nombre de cigarettes fumées auparavant (< 15, 15-24, ou ≥ 25 par jour ou inconnu). Si le tabagisme avait été omis de la stratification, le risque de cancer du poumon aurait augmenté de seulement 2,3 % pour chaque accroissement de 100 Bq/m³ de radon mesuré, et si elle avait été réalisée avec seulement sept catégories, l'augmentation estimée aurait été de 5,2 %. Dans toutes les analyses ultérieures, nous avons intégré une stratification complète du tabagisme.

L'accroissement proportionnel du risque n'est pas influencé par une étude en particulier. Quand nous avons recalculé le risque en omettant chaque étude à tour de rôle, il n'a varié au maximum que par un cinquième de sa valeur. Il n'a pas varié non plus de manière significative en fonction la période utilisée pour calculer l'exposition au radon. Les analyses ci-dessus correspondent à des concentrations en radon mesurées au cours des dernières 5 à 34 années.

Les concentrations en radon mesurées au cours des périodes 5-14, 15-24 et 25-34 années sont fortement corrélées, et donc la relation du risque au radon au cours de ces trois périodes est similaire à celui de la période entière (7,5 %, 7,6 % et 6,6 % respectivement). Lorsque nous considérons les concentrations en radon tout au long des 5-34 années précédentes en pondérant la contribution des périodes 5-14 ans, 15-24 ans et 25-34 ans dans des proportions de 1,0:0,75:0,50 respectivement, comme suggéré dans les études sur les mineurs [2], le risque demeure inchangé à 8,4 % par 100 Bq/m³ de radon mesuré.

Lorsque nous avons réparti la cohorte dans sept catégories suivant la concentration en radon mesurée (tableau 2), les résultats sont compatibles avec une relation linéaire de dose/effet (figure 1). Il n'y a pas de courbure significative de la droite de meilleur ajustement de la régression, et aucun point ne diffère significativement de cette droite. La relation linéaire reste significative même lorsque l'analyse est limitée à des concentrations mesurées < 200 Bq/m³ ($P = 0,04$). Lorsque nous avons comparé les individus dont la valeur de radon mesurée est de 100-199 Bq/m³ (moyenne 136 Bq/m³) à ceux dont le radon mesuré est < 100 Bq/m³ (moyenne 52 Bq/m³), le risque relatif est de 1,20 (intervalle de confiance à 95 % de 1,03 to 1,30 ; $P = 0,01$). Les modèles sans effet jusqu'à une dose « seuil » suivie d'un effet linéaire ne se sont pas mieux adaptés de manière significative que le modèle d'effet linéaire sans seuil; avec de tels modèles la limite supérieure de confiance à 95 % d'un seuil éventuel était de 150 Bq/m³ de radon mesuré.

Modification de l'effet

Il n'a pas été démontré de façon convaincante que l'accroissement proportionnel du risque de cancer du poumon par 100 Bq/m³ de radon mesuré variait en fonction de l'étude ($P = 0,94$), de l'âge ($P = 0,93$), du sexe ($P = 0,19$) ou du tabagisme ($P = 0,98$).

Tableau 1 Études cas-témoins européennes sur l'exposition au radon domestique et le cancer du poumon / *Table 1* European case control studies on domestic exposure to radon and lung cancer

| Étude | Année moyenne de diagnostic | Concentration moyenne en radon mesurée (Bq/m ³)* | |
|--|-----------------------------|--|---------|
| | | Cancers du poumon | Témoins |
| Autriche [9] | 1983 | 267 | 130 |
| République Tchèque [10] | 1981 | 528 | 493 |
| Finlande (étude nationale) [11] | 1989 | 104 | 103 |
| Finlande (sud) [12] | 1982 | 221 | 212 |
| France [13] | 1995 | 138 | 131 |
| Allemagne (Est) [14] | 1994 | 78 | 74 |
| Allemagne (Ouest) [14] | 1993 | 49 | 51 |
| Italie [15] | 1995 | 113 | 102 |
| Espagne [16] | 1993 | 123 | 137 |
| Suède (étude nationale) [17] | 1982 | 99 | 94 |
| Suède (personnes n'ayant jamais fumé) [18] | 1990 | 79 | 72 |
| Suède (Stockholm) [19] | 1985 | 131 | 136 |
| Royaume-Uni [6] | 1991 | 57 | 54 |
| Toutes études réunies | 1990 | 104 | 97** |

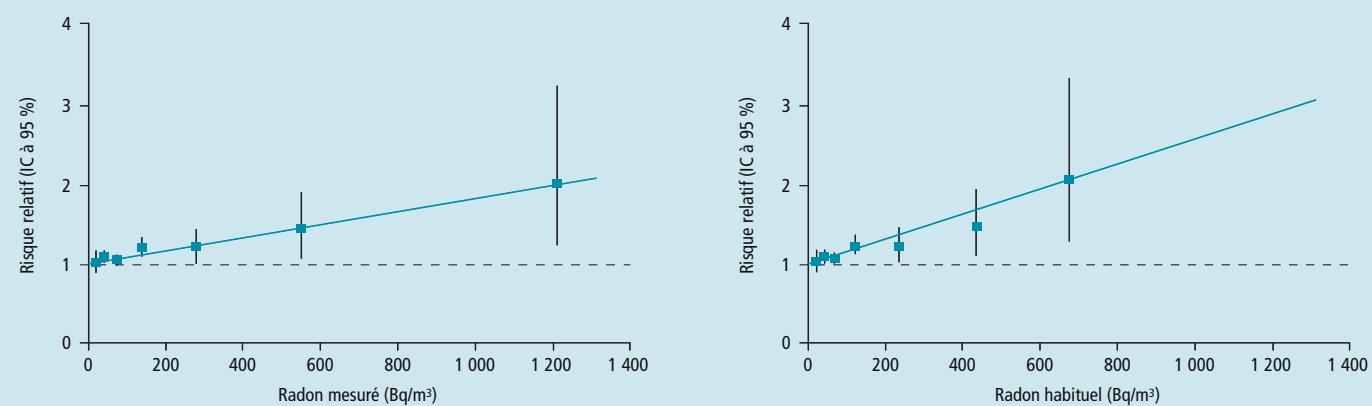
* L'estimation pour chaque individu correspond à la moyenne pondérée des mesures dans les différentes habitations occupées au cours des 5-34 dernières années. ** Moyenne pondérée, poids proportionnels au nombre de cas de cancer du poumon spécifiques à chaque étude.

Tableau 2 Risque relatif de cancer du poumon en fonction de la concentration en radon (Bq/m³) dans les habitations au cours des 5-34 dernières années / *Table 2* Relative risk of lung cancer depending on radon concentration (Bq/m³) in houses during the last 5-34 years

| Plage des valeurs mesurées | Moyenne (Bq/m ³) | | N° de cancers du poumon cas/témoins | Risque relatif (IC à 95 %) |
|----------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| | Valeurs mesurées | Valeurs habituelles estimées | | |
| < 25 | 17 | 21 | 566 / 1 474 | 1,00 (0,87 à 1,15) |
| 25-49 | 39 | 42 | 1 999 / 3 905 | 1,06 (0,98 à 1,15) |
| 50-99 | 71 | 69 | 2 618 / 5 033 | 1,03 (0,96 à 1,10) |
| 100-199 | 136 | 119 | 1 296 / 2 247 | 1,20 (1,08 à 1,32) |
| 200-399 | 273 | 236 | 434 / 936 | 1,18 (0,99 à 1,42) |
| 400-799 | 542 | 433 | 169 / 498 | 1,43 (1,06 à 1,92) |
| ≥ 800 | 1 204 | 678 | 66 / 115 | 2,02 (1,24 à 3,31) |
| Total | 104 / 97* | 90 / 86* | 7 148 / 14 208 | – |

* Cas/témoins. Moyenne pondérée pour les témoins, poids proportionnels au nombre de cas spécifiques à chaque étude. Il est à noter que puisque la variation aléatoire des valeurs mesurées est à peu près logarithmique (donc une mesure deux fois plus grande que la valeur habituelle est aussi probable qu'une mesure deux fois plus petite), les moyennes des valeurs mesurées dépassent légèrement les moyennes des valeurs habituelles estimées.

Figure 1 Risque relatif de cancer du poumon en fonction de la concentration de radon domestique mesurée et la concentration de radon domestique habituelle, avec la droite de meilleur ajustement (les risques sont relatifs à ceux à 0 Bq/m³) / Figure 1 Relative risk of lung cancer depending on the calculated domestic radon concentration and usual domestic concentration with the best adjustment line (the risks are relative to those of 0 Bq/m³)



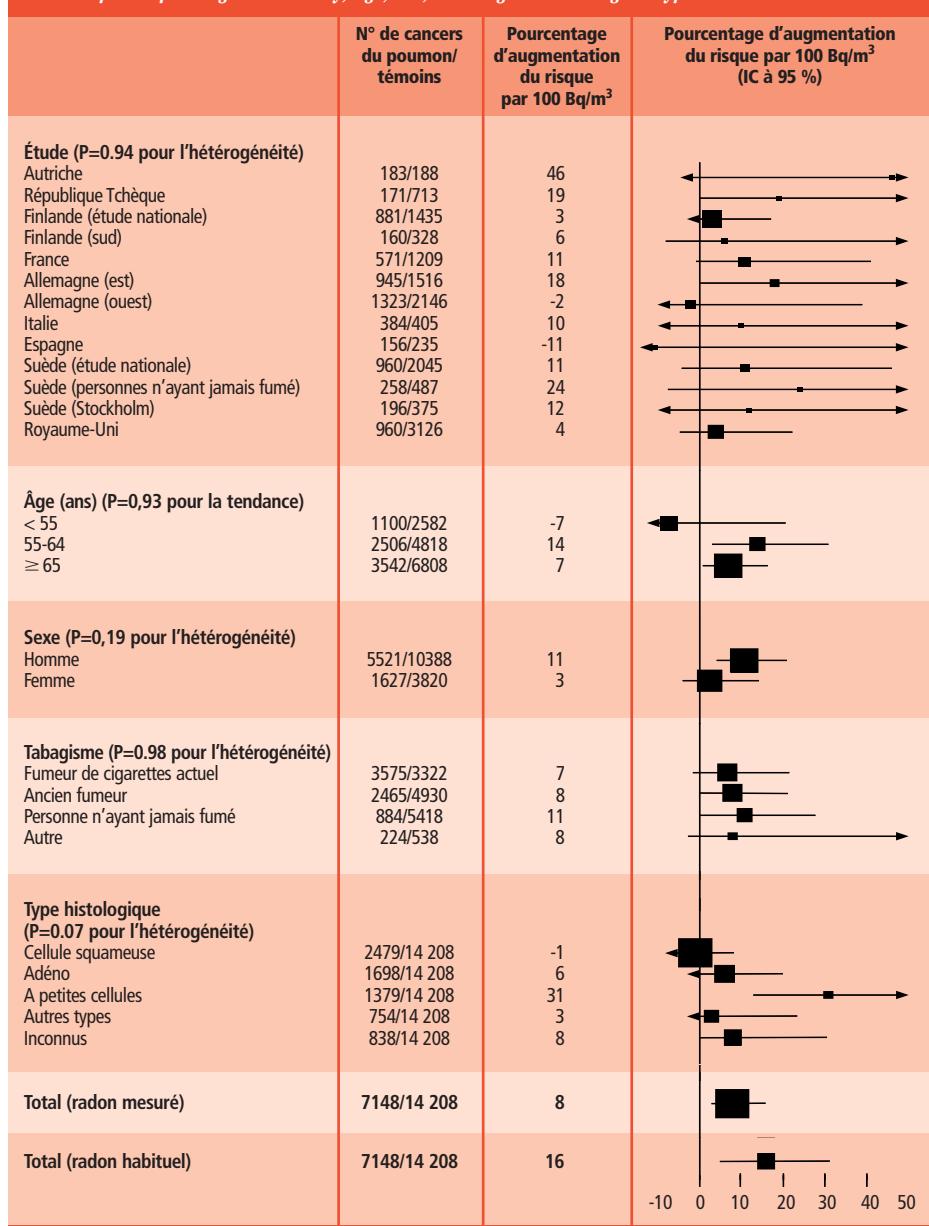
(figure 2). Nous avons rejeté un modèle dans lequel les effets combinés du radon et du tabagisme étaient additifs ($P = 0,05$). Lorsque nous considérons séparément les personnes n'ayant jamais fumé, l'accroissement du risque par 100 Bq/m³ est de 10,6 % (0,3 % à 28,0 %), et il n'y a pas d'évidence qu'il soit fonction de l'âge, du sexe ou des habitudes tabagiques de l'époux(se) ($P = 0,46$, 0,19 et 0,18, respectivement).

Le diagnostic de cancer du poumon a été confirmé par analyse microscopique pour 6 310 individus. La variation entre les relations dose/effet pour les quatre types histologiques identifiés, classés comme dans les études d'origine, n'est pas significative ($P = 0,07$, figure 2). Cependant, l'accroissement du risque par 100 Bq/m³ de radon mesuré est de 31,2 % (12,8 % à 60,6 %) pour le cancer du poumon à petites cellules, alors qu'il n'est que de 2,6 % (< 0 % à 10,2 %) ($P = 0,03$ pour la différence) pour tous les autres types histologiques réunis, ce qui est en accord avec la relation dose/effet à plus forte pente signalée dans les premières études sur des mineurs exposés au radon [2].

Intégration des incertitudes aléatoires dans l'estimation de l'exposition au radon

Les mesures des concentrations en radon dans les habitations au cours de la période de 5-34 ans avant le diagnostic sont sujettes à une incertitude significative. Cette incertitude n'est pas symétrique. Par exemple, si la concentration réelle moyenne à long terme à laquelle était exposé un individu est de 300 Bq/m³, alors la valeur mesurée pour cet individu pourrait, aléatoirement, être supérieure de 500 Bq/m³ (c'est-à-dire mesurée à 800 Bq/m³), surtout si elle dépend de mesures réalisées dans seulement une ou deux habitations, mais elle ne pourra pas être inférieure par 500 Bq/m³. L'analyse détaillée de toutes les données disponibles sur la variabilité de la concentration en radon lors de mesures dans une même habitation effectuées à plusieurs années d'écart indique que, pour la plupart des individus ayant un taux mesuré supérieur à 800 Bq/m³, la valeur mesurée était significativement plus élevée que la valeur habituelle ou la

Figure 2 Augmentation du pourcentage de risque de cancer du poumon par accroissement de 100 Bq/m³ de la concentration en radon mesurée en fonction de l'étude, de l'âge, du sexe, du tabagisme et du type histologique / Figure 2 Increase in the rate of lung cancer risk by increasing radon concentration of 100 Bq/m³ depending on the study, age, sex, smoking and histological type



L'aire des carrés est inversement proportionnelle à l'erreur type de l'augmentation du pourcentage. En ce qui concerne l'étude espagnole, l'estimation actuelle, qui est non-significativement négative, varie par rapport à une estimation positive déjà publiée s'appuyant sur la distribution du radon par quartiles [16]. L'estimation négative, s'appuyant sur les concentrations en radon de chaque individu, est dominée par trois cas et 17 témoins pour lesquels la concentration en radon mesurée ≥ 400 Bq/m³.

valeur réelle à long terme [7]. Ainsi, alors que pour le groupe ayant des concentrations en radon mesurées supérieures à 800 Bq/m^3 , la concentration moyenne mesurée était de $1\ 204 \text{ Bq/m}^3$, la moyenne estimée de leur concentration en radon habituelle est de seulement 678 Bq/m^3 (tableau 2). Si la concentration moyenne en radon habituelle dans ce groupe d'individus fortement exposés est seulement d'environ la moitié de la valeur mesurée moyenne, alors la pente de la droite risque/concentration en radon habituelle devient approximativement deux fois plus forte que celle du risque/concentration en radon mesurée. Quand nous ré-estimons le risque de cancer du poumon après correction des incertitudes des mesures de la concentration en radon, nous constatons qu'il augmente jusqu'à 16 % (5 % à 31 %) par 100 Bq/m^3 de radon habituel. La relation dose/effet calculée avec la concentration en radon habituelle est compatible avec un modèle linéaire (figure 1). Encore une fois, il n'a pas été démontré que le risque par 100 Bq/m^3 soit fonction de l'âge, du sexe ou des habitudes tabagiques [7].

Effet combiné du tabagisme et du radon sur le risque absolu de cancer du poumon

Le risque de cancer du poumon chez les fumeurs actuels de 15-24 cigarettes par jour par rapport aux personnes n'ayant jamais fumé est de 25,8 (21,3 à 31,2) chez les hommes lorsque les 13 études sont combinées (après stratification par étude, âge et région géographique). Donc, une similitude du risque relatif entre les fumeurs et les personnes n'ayant jamais fumé impliquerait des différences significatives au niveau du risque absolu par 100 Bq/m^3 . Si le risque de cancer du poumon augmente d'environ 16 % par 100 Bq/m^3 de radon habituel, sans prendre en compte les habitudes tabagiques, alors à des taux de radon habituels de 0, 100, 400 et 800 Bq/m^3 , respectivement, les

risques absolus cumulatifs de cancer du poumon à l'âge de 75 ans sont de 0,41 %, 0,47 %, 0,67 % et 0,93 % pour les personnes n'ayant jamais fumé et de 10,1 %, 11,6 %, 16,0 % et 21,6 % pour les fumeurs de cigarettes (figure 3).

Discussion

Nous avons pu évaluer directement les risques de l'exposition au radon domestique car notre étude a inclus un grand nombre d'individus atteints de cancer du poumon ainsi que de nombreux individus sains, tous ayant des antécédents détaillés au niveau du tabagisme. Les personnes dont les habitations présentaient une concentration en radon domestique plus élevée avaient tendance à moins fumer et donc l'évaluation de l'ampleur du risque associé au radon a nécessité une stratification détaillée des antécédents de tabagisme, intégrant la quantité de cigarettes fumées et l'âge pour les fumeurs actuels, et la quantité de cigarettes fumées et le nombre d'années depuis l'arrêt pour les anciens fumeurs. Il n'avait pas été possible de réaliser une stratification aussi fine auparavant. La correction de l'erreur introduite par les incertitudes aléatoires dans l'estimation de la concentration en radon domestique pour chaque individu était également importante.

Après stratification par habitudes tabagiques, une association claire entre l'exposition au radon domestique et le cancer du poumon a pu être mise en évidence. La relation dose/effet semblait linéaire sans seuil observable, et la relation demeurait significative même pour les individus dont les concentrations en radon mesurées étaient inférieures à 200 Bq/m^3 .

Correction des erreurs de mesure

Après correction pour les incertitudes aléatoires dans l'évaluation des concentrations en radon, la relation dose/effet de cette étude est restée linéaire

mais sa force a pratiquement doublé à 16 % (5 % à 31 %) par 100 Bq/m^3 . L'ampleur de la correction est approximative car les données sur la variabilité de mesures répétitives réalisées dans la même habitation sur plusieurs années sont limitées, mais une correction significative est incontestablement nécessaire. Des erreurs aléatoires se produisent également au niveau de l'évaluation du tabagisme, et s'il avait été possible de les corriger, nous nous serions attendus à un accroissement supplémentaire de l'effet estimé du radon car il existe une confusion négative entre le tabagisme et le radon. Les concentrations en radon dans une habitation donnée varient d'une pièce à une autre et donc la concentration en radon réelle à laquelle un individu est exposé varie également suivant le temps qu'il passe dans chaque pièce. Cela constitue une source supplémentaire d'incertitudes aléatoires et si cela était pris en compte l'effet estimé du radon augmenterait encore.

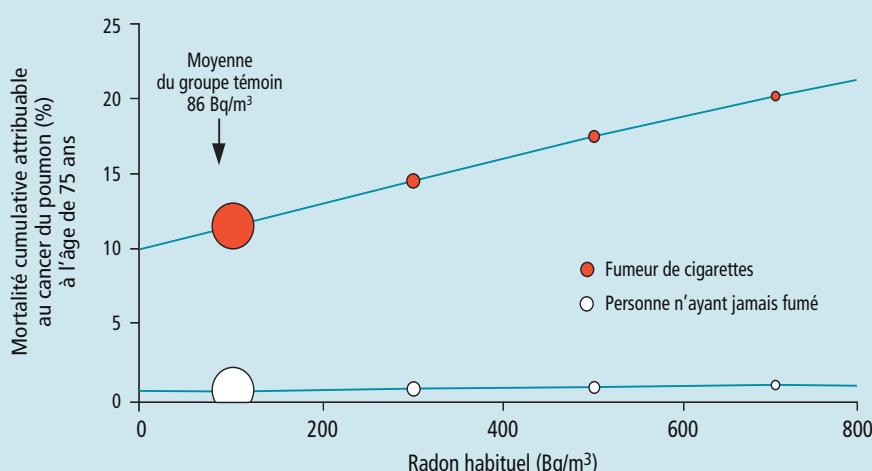
Notre étude repose sur des mesures du radon gazeux effectuées dans un passé récent. Toute augmentation systématique des concentrations en radon au cours des dernières décennies, due par exemple à une efficacité énergétique accrue, constituerait un facteur de dilution supplémentaire à nos estimations de risque actuelles. Des techniques d'estimation des concentrations en radon historiques basées sur la mesure des dégradations dues à la radioactivité accumulée sur la surface d'objets en verre qui ont été dans l'habitation depuis de nombreuses années sont en cours de développement et pourraient aider à résoudre ce problème, mais les incertitudes et erreurs associées à ces techniques, notamment en présence de fumée de tabac environnante ne sont pas pleinement comprises.

Comparaison avec d'autres études sur le radon

Avant l'introduction de la correction pour les incertitudes aléatoires, le risque accru de cancer du poumon de 8 % (3 % à 16 %) par 100 Bq/m^3 dans ces études européennes était compatible avec celui de 11 % (0 % à 28 %) mis en évidence dans une analyse combinée récente d'études Nord Américaines [21]. Cependant, la collaboration européenne a une puissance plus grande et une signification statistique plus extrême car elle inclut deux fois plus de cas de cancer du poumon et des concentrations en radon plus élevées (10 % des valeurs mesurées étaient $> 200 \text{ Bq/m}^3$ par rapport à 5 % dans les études nord-américaines). Nos résultats sont également compatibles avec les résultats réunis de deux études chinoises [22] et une méta-analyse des résultats publiés de 17 études, qui a néanmoins mis en évidence une hétérogénéité manifeste entre les différentes publications [23]. Cette hétérogénéité disparaît dans nos analyses dans lesquelles les données de chaque individu sont recueillies de manière centrale et analysées en utilisant des méthodes uniformes.

Une analyse sur des mineurs exposés à des taux inférieurs à 0,5 « unités d'exposition au travail » (équivalentes à environ $4\ 600 \text{ Bq/m}^3$ de radon domestique) suggère que les risques étaient de 19

Figure 3 Risque absolu cumulatif de décès par un cancer du poumon à l'âge de 75 ans en fonction de la concentration en radon habituelle dans les habitations chez les fumeurs de cigarettes et les personnes n'ayant jamais fumé. / Figure 3 Cumulative absolute risk of death from lung cancer at 75 years of age, depending on the usual radon concentration in smoking and no smoking homes



Les valeurs du graphique ont été calculées en utilisant les risques relatifs du tabagisme chez les hommes de toutes les études combinées, et les risques absolus chez les personnes n'ayant jamais fumé des études réalisées aux Etats-Unis chez les hommes et femmes réunis [20]. L'aire des cercles est proportionnelle au nombre de témoins exposés à des niveaux de radon habituels compris dans les plages < 200, 200-399, 400-599 et $\geq 600 \text{ Bq/m}^3$.

à 30 % par 100 Bq/m³, sans correction de l'effet des incertitudes dans l'évaluation de l'exposition au radon [24]. Ces estimations sont supérieures à, mais demeurent compatibles avec, l'estimation actuelle de 16 % (5 à 31 %).

Risque absolu de l'exposition au radon pour les fumeurs et non-fumeurs

Si les augmentations proportionnelles du risque par unité d'exposition sont à peu près indépendantes des antécédents de tabagisme alors, puisque le cancer du poumon est beaucoup plus fréquent pour les fumeurs de cigarettes que pour les personnes n'ayant jamais fumé, le radon constitue un risque absolu considérablement plus important pour les fumeurs et les anciens fumeurs récents, que pour les personnes n'ayant jamais fumé.

Nous avons démontré que l'exposition au radon domestique occasionne des risques significatifs, en particulier pour les fumeurs, même à des concentrations en dessous des niveaux de quelques centaines de Bq/m³ pour lesquels il est actuellement recommandé d'agir dans de nombreux pays. Le

rapport sur les effets de l'irradiation atomique publié en 2000 par le Comité Scientifique des Nations-Unies a apporté des estimations des concentrations moyennes en radon dans les habitations dans 29 pays européens, avec une moyenne pondérée selon la population de 59 Bq/m³ [1]. Si cela est approximativement exact, et si l'excès de risque du cancer du poumon est d'environ 16 % par 100 Bq/m³ sur une plage étendue de niveaux d'exposition, alors l'exposition au radon domestique serait actuellement à l'origine d'environ 9 % des décès par cancer du poumon et donc 2 % de tous les décès dus au cancer en Europe. Dans la plupart des pays, les concentrations en radon domestique varient fortement, les niveaux dans la plupart des habitations étant bien inférieurs à la moyenne nationale, alors que dans une minorité d'habitatis, les niveaux sont plusieurs fois supérieurs à cette même moyenne. Les concentrations fortes en radon peuvent être réduites à coût modéré, et des concentrations faibles peuvent généralement être atteintes à un coût raisonnable ou bas lorsqu'il s'agit de constructions neuves.

Remerciements

Cet article est dédié à la mémoire d'Olav Axelson (1937-2004) qui a publié la première étude sur l'exposition au radon domestique et le cancer du poumon en 1979 dans la revue *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*. Nous remercions le personnel et les participants aux études conjointes. Richard Peto et Jon Miles ont participé à des discussions bénéfiques pendant la préparation de cet article, Gary Whitlock a commenté une version du manuscrit, et Tom Fearn et David Cox ont apporté des appréciations fort utiles sur les méthodes statistiques.

Collaborateurs : tous les auteurs ont participé à la conception de cette étude. Les données des treize études constituantes étaient sous la responsabilité de WO, LK, ASR, MK, HEW (Autriche) ; République Tchèque : LT (République Tchèque) ; AA, IM, MH (Finlande - étude nationale) ; ER, IM, MH (Finlande - sud) ; HB, MT (France) ; MK, ASR, IH, LK, HEW (Allemagne - est) ; LK, MK, HEW (Allemagne - ouest) ; FB, FF (Italie) ; GP, FL, RF (Suède - étude nationale) ; FL, GP, RF (Suède - non-fumeurs à vie) ; GP (Suède - Stockholm) ; JMB-D, AR-R (Espagne) ; SD, HD, DH, EW, RD (Royaume Uni). CM était coordinateur de la subvention de la Commission Européenne. DH, HD, EW et SD ont réuni les données de toutes les études à Oxford. L'analyse et la rédaction du manuscrit ont été réalisées par SD, DH et RD à partir des données fournies par tous les autres auteurs. SD, DH et RD en sont les garants.

Financement : la fondation Cancer Research UK (subventions au *Clinical Trial Service Unit* et au *Cancer Epidemiology Unit*) et la Commission Européenne (contrat FIGH-CT1999-00008). Les organismes de financement n'ont eu aucune influence sur la conception de l'étude, la collection des données, l'analyse des données, la rédaction du manuscrit ou la décision de soumettre l'article à la publication.

Intérêts concurrents : aucun déclaré.

Accord des comités d'éthique : l'accord des comités d'éthique approprié a été obtenu pour chaque étude.

Références

- [1] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Vol I: Sources. New York: United Nations, 2000.
- [2] National Research Council. Committee on health risks of exposure to radon (BEIR VI). Health effects of exposure to radon. Washington, DC: National Academy Press, 1999.
- [3] International Agency for Research on Cancer. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Vol 78. Ionizing radiation. Part 2: Some internally deposited radionuclides. Lyons: IARC, 2001.
- [4] Puskin JS. Smoking as a confounder in ecologic correlations of cancer mortality rates with average county radon levels. *Health Physics* 2003; 84:526-32.
- [5] Heid IM, Schaffrath Rosario A, Kreienbrock L, Küchenhoff H, Wichmann HE. The impact of measurement error on studies on lung cancer and residential radon exposure in Germany. *J Toxicol Environ Health* (in press).
- [6] Darby S, Whitley E, Silcocks P, Thakrar B, Green M, Lomas P, et al. Risk of lung cancer associated with residential radon exposure in south-west England: a case-control study. *Br J Cancer* 1998; 78:394-408.
- [7] Darby S, Hill D, Deo H, Auvinen A, Barros-Dios JM, Baysson H, et al. Residential radon and lung cancer: detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7,148 subjects with lung cancer and 14,208 subjects without lung cancer from 13 epidemiological studies in Europe. *Scand J Work Environ Health* (in press).
- [8] Lagarde F, Pershagen G, Åkerblom G, Axelson O, Bäverstam U, Damberg L, et al. Residential radon and lung cancer in Sweden: risk analysis accounting for random error in the exposure assessment. *Health Phys* 1997; 72:269-76.
- [9] Oberaigner W, Kreienbrock L, Schaffrath Rosario A, Kreuzer M, Wellmann J, Lerner G, et al. Radon und Lungenkrebs im Bezirk Imst/Ostösterreich. *Fortschritte in der Umweltmedizin*. Landsberg am Lech: Ecomed Verlagsgesellschaft, 2002.
- [10] Tomá Bek L, Müller T, Kunz E, Heribanová A, Matzner J, Plaček V, et al. Study of lung cancer and residential radon in the Czech Republic. *Cent Eur J Public Health* 2001; 9:150-3.
- [11] Auvinen A, Mäkeläinen I, Hakama M, Castrén O, Pukkala E, Reisbacka H, et al. Indoor radon exposure and risk of lung cancer: a nested case-control study in Finland. *J Natl Cancer Inst* 1996; 88:966-72 (plus erratum 1998; 90:401-2).
- [12] Ruosteenoja E, Mäkeläinen I, Rytömaa T, Hakulinen T, Hakama M. Radon and lung cancer in Finland. *Health Phys* 1996; 71:185-9.
- [13] Baysson H, Tirmarche M, Tymin G, Gouva S, Caillaud D, Artus JC, et al. Case-control study on lung cancer and indoor radon in France. *Epidemiology* 2004; 15:709-16.
- [14] Wichmann HE, Schaffrath Rosario A, Heid IM, Kreuzer M, Heinrich J, Kreienbrock L. Lung cancer risk due to residential radon in a pooled and extended analysis of studies in Germany. *Health Physics* (in press).
- [15] Bochicchio F, Forastiere F, Farchi S, Quarto M, Axelson A. Residential radon exposure, diet and lung cancer: a case-control study in a Mediterranean region. *Int J Cancer* (in press).
- [16] Barros-Dios JM, Barreiro MA, Ruano-Ravina A, Figueiras A. Exposure to residential radon and lung cancer in Spain: a population-based case-control study. *Am J Epidemiol* 2002; 156:548-55.
- [17] Pershagen G, Åkerblom G, Axelson O, Clavensjö B, Damberg L, Desai G, et al. Residential radon exposure and lung cancer in Sweden. *N Engl J Med* 1994; 330:159-64.
- [18] Lagarde F, Axelsson G, Damberg L, Mellander H, Nyberg F, Pershagen G. Residential radon and lung cancer among never-smokers in Sweden. *Epidemiology* 2001; 12:396-404.
- [19] Pershagen G, Liang Z-H, Hrubec Z, Svensson C, Boice Jr JD. Residential radon exposure and lung cancer in Swedish women. *Health Phys* 1992; 63:179-86.
- [20] Peto R, Lopez A, Boreham J, Thun M, Heath C. Mortality from tobacco in developed countries: indirect estimation from national vital statistics. *Lancet* 1992; 339:1268-78.
- [21] Krewski D, Lubin JH, Zielinski JM, Alavanja M, Catalan VS, Field RW, et al. A combined analysis of North American case-control studies of residential radon and lung cancer. *Epidemiology* (in press).
- [22] Lubin JH, Wang ZY, Boice JD Jr, Xu ZY, Blot WJ, Wang LD, et al. Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies. *Int J Cancer* 2004; 109:132-7.
- [23] Pavia M, Bianco A, Pileggi C, Angelillo IF. Meta-analysis of residential exposure to radon gas and lung cancer. *Bull World Health Organ* 2003; 81:732-8.
- [24] Lubin JH, Tomá Bek L, Edling C, Hornung RW, Howe G, Kunz E, et al. Estimating lung cancer mortality from residential radon using data for low exposures of miners. *Radiat Res* 997; 147:126-34. (Accepted 2 November 2004) doi 10.1136/bmjj.38308.477650.63.

Évaluation de l'impact sanitaire de l'exposition domestique au radon en France

Olivier Catelinois (o.catelinois@invs.sante.fr)¹, Agnès Rogel², Dominique Laurier², Solène Billon², Denis Hémon³, Pierre Verger⁴, Margot Tirmarche²

1 / Institut de veille sanitaire, Saint-Maurice, France 2 / Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, Fontenay-aux-Roses, France 3 / Inserm IFR69, Villejuif, France

4 / Observatoire régional de la santé PACA, Marseille, France

Résumé/Abstract

Le radon est un gaz radioactif d'origine naturelle qui se concentre dans l'habitat mal ventillé. C'est un agent cancérogène pulmonaire certain chez l'homme. L'exposition de l'ensemble de la population française à des concentrations très variées de radon pose la question de son impact en termes de santé publique. Afin de fournir des éléments de réponse, cette étude propose l'évaluation prédictive de l'impact sanitaire de l'exposition domestique au radon en France métropolitaine. Utilisant l'ensemble des données disponibles sur la relation entre l'exposition et le risque de cancer du poumon et sur l'estimation des expositions de la population française, cette étude est basée sur la démarche de l'évaluation quantitative des risques sanitaires ; elle comprend une analyse de la variabilité et des incertitudes qui permet le calcul d'un intervalle d'incertitude autour de la prédition. Le nombre annuel de décès par cancer du poumon qui serait attribuable à l'exposition domestique au radon en France métropolitaine varie de 1 234 (Intervalle d'incertitude à 90 % : 593 - 2 156) à 2 913 (Intervalle d'incertitude à 90 % : 2 763 - 3 221) en fonction des relations exposition-réponse utilisées. Ces chiffres montrent que l'exposition domestique au radon constitue un enjeu majeur de santé publique en France.

Assessment of the health impact related to indoor exposure to radon in France

Radon is a naturally occurring radioactive gas which concentrates in deficiently ventilated habitations. Radon is a well-established human pulmonary carcinogen agent. The exposition of the overall French population to various radon concentrations led scientists to assess its public health impact. This study proposes a predictive assessment of health impact attributable to indoor radon exposure in metropolitan France. Using all available data on the exposure-response between radon exposure and lung cancer mortality risk and on the assessment of indoor radon exposure in France, this study is based on quantitative safety risk assessment method associated to an analysis of both variability and uncertainty, which allows to measure an uncertainty interval related to the prediction. The estimated annual number of lung cancer deaths attributable to indoor radon exposure ranges from 1 234 (90% uncertainty interval, 593-2 156) to 2 913 (90% UI, 2 763-3 221), depending on the model considered. This result shows that indoor radon exposure is a serious public health problem in France.

Mots clés/Key words

Radon, cancer du poumon, évaluation des risques, impact sanitaire / *Radon, lung cancer, risk assessment, health impact*

Introduction

Le radon est aujourd'hui considéré comme étant la source principale d'exposition de la population générale aux rayonnements ionisants. L'exposition au radon représenterait en moyenne 59 % du bilan radiologique dû aux rayonnements d'origine naturelle [1]. Sur la base des études expérimentales et épidémiologiques, le Centre international de recherche sur le cancer (Circ) a classé le radon comme cancérogène pulmonaire certain chez l'homme (groupe 1) [2].

Des campagnes de mesure dans l'habitat ont été entreprises dans plusieurs pays. En France, la campagne IRSN/DGS qui a débutée au début des années 80 et qui se poursuit aujourd'hui montre l'ubiquité du radon et une grande variabilité des concentrations moyennes dans l'habitat. En 2002, la moyenne arithmétique brute des 12 261 mesures françaises s'élevait à 89 Bq/m³ [3]. A l'échelle nationale, la moyenne arithmétique corrigée de l'effet saison s'élevait à 87 Bq/m³. De telles données d'exposition, combinées à la dangerosité du radon, rendent nécessaire l'évaluation quantitative du risque de cancer du poumon attribuable à l'exposition domestique au radon.

L'objectif de cette étude est d'évaluer le nombre de décès annuel par cancer du poumon attribuable à l'exposition domestique au radon en France. Elle

s'appuie sur l'ensemble des résultats épidémiologiques publiés à ce jour et sur l'ensemble des données d'exposition au radon dans l'habitat français. Une attention particulière a été portée sur la prise en compte des incertitudes autour de la relation exposition-réponse d'une part et, de la variabilité des expositions domestiques au radon en France d'autre part. Cet article ne présente qu'une partie des résultats de l'étude : l'ensemble des résultats fait l'objet d'une publication dans une revue internationale [4].

Matériels et méthodes

Ce travail s'inspire de la démarche classique de l'EQRS proposée par Covello et Merkhofer [5]. Le nombre de décès par cancer du poumon associé à l'exposition domestique au radon est estimé en quatre étapes : identification de la population, choix de la relation exposition-réponse, estimation des expositions et caractérisation des risques.

Identification de la population

Les données de population par âge, sexe et département sont issues du recensement de 1999 réalisé par l'Institut national de la statistique et des études économiques (Insee). Cette étude porte sur l'ensemble de la population française métropolitaine constituée de 61 889 304 individus.

Choix de la relation exposition-réponse

Que ce soit chez les mineurs de fond ou en population générale, un nombre important d'études épidémiologiques est aujourd'hui disponible pour évaluer le risque attribuable à l'exposition domestique au radon. Leurs conclusions sont proches et proposent des coefficients de risque exprimés en excès de risque relatif. Les relations exposition-réponse issues des analyses portant sur les cohortes de mineurs de fond proposées par le BEIR6 et les analyses conjointes des études cas-témoins menées en population générale nord-américaine d'une part et européenne d'autre part ont été retenues [6,7,8]. Parmi les cinq coefficients de risque issus de l'analyse conjointe nord-américaine, nous avons fait le choix d'utiliser ceux qui ont été estimés à partir des individus pour lesquels la durée couverte par les mesures était supérieure ou égale à 25 ans afin de limiter les incertitudes inhérentes à l'évaluation des expositions.

Le principal facteur de risque du cancer du poumon est le tabagisme actif ce qui rend essentielle la quantification de l'interaction tabac-radon sur le risque de décès par cancer du poumon. Les récentes études concluent qu'approximativement 94 % des décès par cancer du poumon surviennent chez des fumeurs ou anciens fumeurs [9]. En 1999, le

BEIR6 a analysé cette interaction à partir des données disponibles sur 5 des 11 cohortes internationales de mineurs de fond. Malgré le manque de données collectées, le BEIR6 a conclu à une interaction de type sub-multiplicative entre le tabac et le radon sur le risque de décès par cancer du poumon. Le BEIR6 a ainsi proposé de modifier les coefficients de risque par unité d'exposition des modèles âge-durée et âge-concentration en le multipliant par deux pour les non-fumeurs et par 0,9 pour les fumeurs. Cette modification tient compte à la fois de la forme du modèle (coefficients d'excès de risque relatif par unité d'exposition) et du nombre de décès spontané (qui ne sont pas associés à l'exposition domestique au radon) beaucoup plus élevés chez les fumeurs que chez les non-fumeurs.

Dans ce travail, six relations exposition-réponse ont été retenues : quatre relations linéaires avec facteurs modifiants (les modèles âge-durée et âge-concentration du BEIR6 dont ceux qui permettent de tenir compte de l'interaction tabac-radon) et deux relations sans facteur modifiant : le modèle issu de l'analyse conjointe nord-américaine et le modèle issu de l'analyse européenne.

Estimation des expositions

L'exposition domestique au radon en France a été estimée par département à partir des 12 261 mesures réalisées par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire et la Direction générale de la santé depuis 1980 dans le cadre d'une campagne nationale de mesures [10]. L'activité volumique du radon (ou concentration de radon) à l'intérieur des habitations est exprimée en Becquerel par mètre cube (Bq/m³). Elle a été mesurée sur une période minimale de deux mois à l'aide d'un dosimètre Radon-Kodalpha® qui a été validé par le National Radiological Protection Board et l'US-EPA. Afin de prendre en compte les variations saisonnières des concentrations en radon dans l'habitat français, les données d'exposition ont été corrigées [11]. En revanche, les variations en fonction du type de logement n'ont pas été prises en compte dans ce travail en raison du manque de données dans certains départements. La moyenne nationale brute de 89 Bq/m³ est ramenée à 87 Bq/m³ en appliquant les corrections saisonnières et à 83 Bq/m³ en appliquant les corrections saisonnières et pour le logement [3]. Cette moyenne arithmétique nationale corrigée pour la saison, le type de logement et la densité de population diminue à 63 Bq/m³, du fait que les départements les plus peuplés présentent en générale des concentrations moyennes basses, comme par exemple l'Île-de-France. L'effet de la densité de population est prise en compte dans cette étude car les décès par cancer du poumon attribuables à l'exposition domestique au radon ont été évalués par département.

Caractérisation des risques

Le nombre total annuel des décès par cancer du poumon en France par âge, par sexe et par département est disponible auprès de l'Institut national

de la santé et de la recherche médicale (Inserm). En 1999, ce nombre s'élève à 25 134. Parmi ces décès, certains sont dus au tabagisme, d'autres au radon seul, d'autres à la fois au tabac et au radon (interaction tabac-radon) et le reste à d'autres facteurs de risque notamment la pollution atmosphérique. Afin d'évaluer le nombre de décès par cancer du poumon attribuable à l'exposition domestique au radon, les données d'exposition au radon, le nombre de décès total par cancer du poumon et les relations exposition-réponse ont été combinées selon la formule suivante :

$$N_{Rd,a,d} = (RR_{a,Rd} \times N_{T,a,d}) / (1 + RR_{a,Rd})$$

où $N_{Rd,a,d}$ est le nombre annuel de décès par cancer du poumon attribuable à l'exposition domestique au radon à l'âge a et pour le département d , $RR_{a,Rd}$ est le risque relatif pour l'âge a et une exposition au radon Rd et $N_{T,a,d}$ est le nombre total annuel de décès par cancer du poumon à l'âge a et dans le département d . Les calculs ont été réalisés par âge, par sexe et par département.

La prise en compte de l'interaction tabac-radon nécessite la connaissance du pourcentage de fumeurs au sein de la population. Elle est disponible auprès du Credes grâce aux enquêtes réalisées dans les années 1990. Elles fournissent des pourcentages de fumeurs par sexe, classe d'âge et zone d'étude et d'aménagement du territoire (ZEAT). La caractérisation des risques tenant compte de l'interaction tabac-radon n'a ainsi pu être réalisée qu'à l'échelle de la ZEAT.

Afin de tenir compte de la variabilité des concentrations de radon dans l'habitat, les données de la campagne de mesures sont stratifiées par département et par déciles. Les incertitudes associées à

l'estimation de la relation exposition-réponse sont considérées en deux étapes. La première consiste à retenir plusieurs modèles de risque provenant d'études diverses et de comparer les estimations moyennes. La seconde étape consiste à utiliser une méthode probabiliste afin de quantifier les incertitudes autour des coefficients de risque. Ce travail permet de déterminer un intervalle d'incertitude autour du nombre de décès par cancer du poumon calculé pour chacune des quatre relations exposition-réponse utilisées. La méthode probabiliste consiste à supposer que ces relations se distribuent selon une loi de probabilité caractérisée par des paramètres statistiques. Les lois de distribution des coefficients de risque par unité d'exposition sont choisies au regard des données publiées dans la littérature : une distribution normale a ainsi été appliquée. En raison du manque de données épidémiologiques, le BEIR6 ne propose pas de variance autour du coefficient d'interaction tabac-radon. Néanmoins, afin de tenir compte de la fluctuation possible de cette variable, nous faisons l'hypothèse a priori que le coefficient varie de plus ou moins 10 % selon une loi uniforme.

L'analyse d'incertitude est conduite avec le logiciel @Risk [12] en réalisant 5 000 itérations par simulation, avec un échantillonnage de type Hypercube Latin. Cette analyse permet d'obtenir un intervalle d'incertitude autour du nombre de décès moyen annuel estimé. La dispersion des prédictions des modèles autour de la moyenne rend compte de l'importance des incertitudes : plus la dispersion est élevée, plus les incertitudes sont grandes. La dispersion est mesurée en divisant le 95^e percentile par le 5^e percentile.

Tableau 1 Évaluation du nombre de décès par cancer du poumon attribuable à l'exposition domestique au radon en France en 1999 en fonction de différentes relations exposition-réponse
Table 1 Assessment of the number of lung cancer deaths attributable to indoor radon exposure in France in 1999 depending on the different exposure-response relations

| Relations exposition-réponse | Nombre de décès attribuables par cancer du poumon | | | | Pourcentage attribuable | |
|---|---|------------|------------------------|------------|-------------------------|------------------------|
| | Moyenne | Écart type | IU (90 %) ^a | Dispersion | Moyenne | IU (90 %) ^a |
| Cohorte de mineurs | | | | | | |
| Âge durée (BEIR6) | 2 066 | 82 | 1 934-2 203 | 1,14 | 8 | 8-9 |
| Âge concentration (BEIR6) | 2 913 | 92 | 2 763-3 067 | 1,11 | 12 | 11-12 |
| Analyses conjointes des étude cas-témoins | | | | | | |
| Lubin | 2 642 | 1 396 | 518-5 121 | 9,90 | 11 | 2-20 |
| Darby | 1 234 | 492 | 593-2 156 | 3,64 | 5 | 2-9 |

^a Intervalle d'incertitude à 90 %.

Tableau 2 Évaluation du nombre de décès par cancer du poumon attribuable à l'exposition domestique au radon en France en 1999 en considérant l'interaction tabac-radon
Table 2 Assessment of the number of lung cancer deaths attributable to indoor radon exposure in France in 1999, considering the interaction between tobacco and radon

| Relations exposition-réponse | Nombre de décès attribuables par cancer du poumon | | | | Pourcentage attribuable | |
|------------------------------|---|------------|------------------------|------------|-------------------------|------------------------|
| | Moyenne | Écart type | IU (90 %) ^a | Dispersion | Moyenne | IU (90 %) ^a |
| Âge durée (BEIR6) | | | | | | |
| Fumeurs | 1 819 | 122 | 1 624-2 019 | 1,24 | 8 | 7-9 |
| Non fumeurs | 541 | 33 | 489-597 | 1,22 | 36 | 32-40 |
| Total | 2 361 | | 2 112-2 616 | | 9 | 8-10 |
| Âge concentration (BEIR6) | | | | | | |
| Fumeurs | 2 578 | 155 | 2 329-2 830 | 1,22 | 11 | 10-12 |
| Non fumeurs | 759 | 37 | 700-822 | 1,17 | 50 | 46-55 |
| Total | 3 337 | | 3 029-3 652 | | 13 | 12-15 |

^a Intervalle d'incertitude à 90 %.

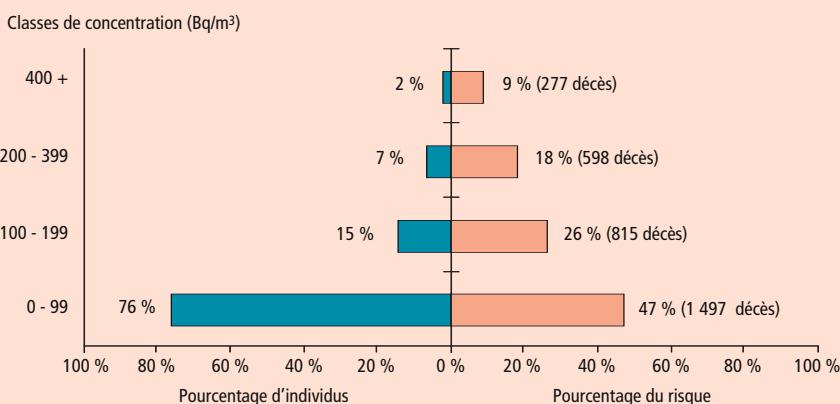
Résultats

Le nombre évalué de décès par cancer du poumon attribuable à l'exposition domestique au radon en France métropolitaine, en 1999, varie de 1 234 (Intervalle d'incertitude à 90 % : 593 - 2 156) à 2 913 (Intervalle d'incertitude à 90 % : 2 763 - 3 221) en fonction des relations exposition-réponse (tableau 1). Ainsi, parmi les 25 134 décès par cancer du poumon survenus en 1999 en France, entre 5 % (Intervalle d'incertitude à 90 % : 2,4 - 9,0) et 12 % (11,0 - 12,1) seraient attribuables à l'exposition domestique au radon.

La prise en compte de l'interaction tabac-radon montre que le risque serait trois fois plus élevé chez les fumeurs (tableau 2). Chez les fumeurs, entre 8 % (Intervalle d'incertitude à 90 % : 7 - 9) et 11 % (Intervalle d'incertitude à 90 % : 10 - 12) des décès par cancer du poumon pourraient être attribuables à l'exposition domestique au radon. Chez les non-fumeurs, ce pourcentage serait compris entre 36 % (Intervalle d'incertitude à 90 % : 32 - 40) et 50 % (Intervalle d'incertitude à 90 % : 46 - 55).

La majorité des cancers du poumon en France serait attribuable aux expositions inférieures à 200 Bq/m³ (figure 1). Ces résultats sont à mettre en parallèle avec le nombre d'individus présents dans chacune des classes d'exposition. Ainsi, 47 % du nombre estimé de décès par cancer du poumon attribuables

Figure 1 Proportions de décès par cancer du poumon attribuables par classes d'exposition, calculées sur la base des moyennes arithmétiques par ZEAT (Zone d'étude et d'Aménagement du Territoire) corrigées de l'effet saison avec le modèle âge concentration du BEIR 6 / *Figure 1* Proportion of lung cancer deaths attributable to indoor radon exposure by classes of exposure, computation based on arithmetic mean by ZEAT (French administrative entities approximately 60,000 km² in area) of indoor radon measurement corrected from seasonal effect according to the age concentration model of the BEIR 6.



à l'exposition domestique au radon surviendrait parmi 76 % des français qui sont exposés à des concentrations comprises entre 0 et 99 Bq/m³. En revanche, 27 % du nombre estimé de décès par cancer du poumon attribuable à l'exposition domestique au radon surviendrait parmi 9 % des français qui sont exposés à des concentrations supérieures à 200 Bq/m³.

Discussion

L'important impact de santé publique associé à l'exposition domestique au radon en France est clairement montré dans cette étude. Ainsi, en fonction des modèles de risque, entre 1 234 et 2 913 décès par cancer du poumon seraient attribuables chaque année à l'exposition domestique au radon soit entre 5 % et 12 % des décès par cancer du poumon en France. Environ 8 à 11 % des décès par cancer du poumon chez les fumeurs seraient attribuables à l'exposition domestique au radon. Compte tenu des hypothèses adoptées par le Beir 6, chez les non-fumeurs, la prédition de cette part attribuable est comprise entre 36 et 50 %. Cela place l'exposition domestique au radon à la seconde place des facteurs de risque des cancers du poumon, loin derrière le tabac. En raison de l'interaction entre le tabac et le radon sur le risque de décès par cancer du poumon, la diminution de la consommation tabagique permet indirectement de diminuer la part attribuable au radon dans le nombre de décès annuel par cancer du poumon.

Bien que la plupart de ces décès seraient attribuables à des expositions inférieures à 200 Bq/m³, 27 % de ces décès surviendraient parmi les 9 % des français exposés à plus de 200 Bq/m³. D'autres prédictions ont été réalisées en France. A l'échelle nationale, une étude basée sur la distribution nationale des expositions domestiques au radon, a estimé que la proportion de cancers attribuables à l'exposition domestique au radon est de 13 % [13]. Réalisés à l'échelle régionale (en Bretagne et en Corse) [14,15], ces travaux montrent un important impact de santé publique associé à l'exposition domestique au radon. Ainsi, l'évaluation des risques réalisée en Corse fait ressortir que 21,5 à 28,0 % des décès par cancer du poumon seraient attribuables au radon présent dans les habitations.

Les prédictions, réalisées à l'échelle nationale, de décès par cancer du poumon attribuable à l'exposition domestique au radon ont été calculées pour l'année 1999. Néanmoins, plusieurs éléments permettent de généraliser ces résultats à la période

Projet européen de recherche Alpha-Risk



Le projet européen de recherche Alpha-Risk a débuté en juillet 2005 pour une durée de trois ans et entre dans le cadre du PCRD6. Ce projet porte sur la quantification des risques de cancers ou de pathologies non cancéreuses associés aux expositions cumulées aux rayonnements ionisants. Les expositions étudiées couvrent à la fois l'irradiation externe et l'inhalation d'émetteurs alpha, notamment le radon et ses descendants à demi-vie courte, ou d'autres contaminations internes comme l'uranium et le plutonium. Ce projet est coordonné par le Laboratoire d'épidémiologie de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (le LEPID). Ce projet repose sur la collaboration d'experts en épidémiologie, dosimétrie, statistiques et modélisation. Ces experts sont issus des 18 principales équipes européennes venant de 9 pays différents qui sont impliquées dans le suivi des populations ayant un enregistrement précis de leur dosimétrie interne individuelle. Des études cas-témoins et des études de cohortes ont été lancées selon des protocoles identiques, ce qui permet notamment pour l'exposition au radon, de disposer aujourd'hui d'un grand nombre de données, aussi bien après exposition en milieu professionnel qu'en population générale.

Ce projet de recherche offre la possibilité de préciser la relation entre l'exposition et les effets sanitaires pour des expositions chroniques faibles et étalées dans le temps. En particulier, ce projet permettra l'analyse conjointe des principales données épidémiologiques rassemblées au niveau mondial permettant la quantification de la relation entre l'exposition domestique au radon et à ses descendants et le risque de cancer du poumon. Ces données sont issues des études cas-témoins menées en population générale publiées en Europe, en Chine et sur le continent nord-américain. La mise en commun de l'ensemble de ces études qui ont un protocole commun permettra d'augmenter sensiblement la puissance statistique des études épidémiologiques publiées à ce jour et ainsi d'être en mesure d'étudier l'impact de différents facteurs modifiants la relation notamment le délai d'exposition et la consommation tabagique. L'objectif final du projet Alpha-Risk est d'aboutir à un consensus scientifique sur la relation exposition-réponse.

Enfin Alpha-Risk apportera une information synthétique concernant les risques aux faibles doses qui pourra être communiquée au grand public et qui constituera un support pour la politique européenne en matière de santé publique et de radioprotection. La Commission internationale de protection radiologique (CIPR) a lancé en 2006 un groupe de travail chargé d'évaluer le risque de cancer lié à une exposition de type alpha : les résultats provenant du programme Alpha-Risk apporteront une contribution notable à cette évaluation. Pour plus de renseignement, <http://www.alpha-risk.org>.

actuelle. Depuis 1999, il n'y a pas eu de disposition particulière d'envergure nationale pour réduire les concentrations de radon dans l'habitat français. De plus, le risque prédit dans ce travail est attribuable à une exposition chronique s'étalant sur plusieurs dizaines d'années. Ainsi, les répercussions sanitaires d'une politique de diminution des concentrations de radon dans l'habitat ne devraient être observables que plusieurs années après. Enfin, le nombre de décès par cancer du poumon en France a peu évolué entre 1999 et 2004 : ce nombre est passé de 25 134 décès par cancer du poumon à 26 746. Cette étude souligne l'importance du choix de la relation exposition-réponse et de la quantification des incertitudes dans les évaluations quantitatives des risques sanitaires associés à l'exposition domestique au radon. Les incertitudes autour de ces estimations sont de plusieurs natures : elles sont dues, d'une part, à la grande variabilité des concentrations de radon mesurables d'un habitat à l'autre et, d'autre part, aux incertitudes autour de la relation exposition-réponse. La prise en compte de l'ensemble de ces incertitudes dans l'étude permet de cerner leur impact sur la caractérisation des risques associés à l'exposition au radon domestique. Afin de diminuer les incertitudes inhérentes à la connaissance de la relation exposition-réponse et

des expositions, la conduite de nouvelles études épidémiologiques et la poursuite des campagnes de mesures du radon dans l'habitat français s'avèrent aujourd'hui indispensables. Actuellement, le projet Alpha-RISK permet de contribuer à l'amélioration des connaissances des effets du radon sur la santé des populations. De plus, les campagnes de mesures réalisées à l'échelle régionale permettent également d'améliorer la caractérisation des expositions domestiques au radon.

Références

- [1] Sugier A et Hubert P. 2002. Dans le domaine des rayonnements ionisants, les données dosimétriques existantes sont-elles suffisantes ? *Resp.* 50(1):13-26.
- [2] IARC (International Agency for Research on Cancer). 1988. *Man-made Mineral Fibres and Radon*. Monogr Eval Carcinog Risk Hum. 43:1-300.
- [3] Billon S, Morin A, Caer S et coll. 2005. French population exposure to radon, terrestrial gamma and cosmic rays. *Radiat Prot Dosim* 113:314-20.
- [4] Catelinois O, Rogel A, Laurier D et coll. 2006. Lung cancer attributable to indoor radon exposure in France: impact of the risk models and uncertainty analysis. *Environ Health Perspect* 114(9): 1361-66.
- [5] Covello V, Merkhofer M. 1993. Risk assessment methods. *Approaches for assessing health and environmental risks*. New York/London: Plenum Press.
- [6] BEIR (Committee on Biological Effects of Ionizing Radiation). *Health effects of exposure to radon*. 1999. BEIR VI. Washington, DC: National Academy Press.
- [7] Lubin JH. 2003. Studies of radon and lung cancer in North America and China. *Radiat Prot Dosim* 104(4):315-19.
- [8] Darby S, Hill D, Auvienne A et coll. 2004. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ*. 330(7485):223; doi: 10.1136/bmj.38308.477650.63 [Online 19 December 2006].
- [9] Peto R, Darby S, Deo H et coll. 2000. Smoking, smoking cessation and lung cancer in the UK since 1950: combination of national statistics with two case-control studies. *BMJ*. 321(7275):323-29.
- [10] Gambard JP, Mitton N, Pirard P. 2000. Campagne nationale de mesure de l'exposition domestique au radon IRSN-DGS. Bilan et représentation cartographique des mesures au 1^{er} Janvier 2000. Fontenay-aux-Roses, France: Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire.
- [11] Baysson H, Billon S, Laurier D et coll. 2003. Seasonal correction factors for estimating radon exposure in dwellings in France. *Radiat Prot Dosim* 104(3):245-52.
- [12] Palisade. 2001. @Risk. Advance Risk Analysis for spreadsheets, version 4.0.5: Newfield, NY:Palisade corporation.
- [13] Pirard P. Exposition et estimation du risque en France. IN Actes du colloque de la Société Française de Santé Publique « Exposition au radon dans les habitations, évaluation et gestion du risque ». Paris 2 et 3 Février 1998. Collection Santé & Société n°8 Avril 2000, pp 127-144.
- [14] Pirard P et Hubert P. Le radon en Bretagne: évaluation de l'exposition et du risque associé. Fontenay-aux-Roses: Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire; 2001. Rappel N° 00-79.
- [15] Franke F et Pirard P. Le radon en Corse: évaluation de l'exposition et des risques associés. Février 2006. Saint-Maurice, France: Institut de veille sanitaire.

Caractérisation des risques radon dans les régions : faire s'approprier par les acteurs un problème de santé publique méconnu

Philippe Pirard (p.pirard@invs.sante.fr)¹, Florian Franke², Claude Thillier¹

1 / Institut de veille sanitaire, Saint-Maurice, France 2 / Cellule interrégionale d'épidémiologie, Marseille, France

Résumé/Abstract

Nous passons 90 % de notre vie dans les bâtiments et le caractère cancérogène du radon est reconnu. En France pourtant, même parmi les acteurs potentiels de la gestion, un débat persiste quant à son impact sur la santé publique. Dans les régions définies comme étant à potentiel radon, l'enjeu est de faire connaître aux différents acteurs (dont le public), l'état des connaissances scientifiques sur ce polluant et ses effets, d'illustrer l'impact de l'exposition sur la santé de la population et de guider l'orientation des actions, tout en permettant aux acteurs du domaine d'apprécier les incertitudes associées. Les Cellules interrégionales d'épidémiologie (Institut de veille sanitaire) sont appelées à réaliser ce travail. Au travers de la synthèse des deux études déjà réalisées dans des régions à potentiel élevé de radon, cet article présente la démarche, sa méthode, ses limites et intérêts pour la gestion, ainsi que les voies d'amélioration de celle-ci. Les deux études ont été réalisées en Bretagne et en Corse sur la base des mesures de la campagne réalisée dans l'habitat par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire et le ministère chargé de la Santé. La fraction de risque et le nombre de décès annuels par cancer du poumon attribuables à une exposition vie entière au radon ont été estimés pour les distributions brutes et redressées en se basant sur un modèle proposé par le BEIR VI qui fait consensus actuellement auprès des experts. On observe ainsi pour des expositions moyennes à 98 Bq/m³ et à 197 Bq/m³, une fraction de risque attribuable respectivement de l'ordre de 20 % et de 30 %. Les résultats montrent dans ces régions à potentiel radon qu'au moins 50 % du risque est attribuable aux concentrations supérieures à 100 Bq/m³ et que réduire l'exposition lorsque les concentrations sont supérieures à 200 ou 400 Bq/m³ à des niveaux plus faibles a une efficacité notable sur l'impact sanitaire au sein de la popula-

Characterisation of radon risks in regions: raising stakeholders' awareness of an underestimated public health issue

We spend 90 per cent of our life in buildings and radon is a proven carcinogen agent. However, in France a debate is ongoing among potential stakeholders as to whether radon has a public health impact or not. In the regions where radon is a potential issue, the stake is to inform the various actors (including the population) of the scientific level of evidence on the effects of radon exposure, to assess its public health impact, to target actions while at the same time giving the opportunity to those actors to assess the remaining uncertainties. This task is incumbent upon the "Cellules interrégionales d'épidémiologie" (Interregional Epidemiology Centres). Through the synthesis of studies conducted in two French regions with a high potential for radon, this article presents the approach, its methodology, its limitations and interests in management and delineates ways of improvements. The two studies were conducted in Brittany and in Corsica on the basis of results of a terms of campaign related to indoor radon by the Institute of Radioprotection and Nuclear Safety and the Ministry of Health. The risk fraction as well as the annual number of lung cancer deaths attributable to lifelong radon exposure were estimated for crude adjusted distributions based on the BEIR VI model, which is a reference for experts. For mean exposures of 98 Bq/m³ and of 197 Bq/m³ an attributable risk fraction of respectively 20% and 30% was observed. Results show that in regions with a real radon potential, at least 50% of the attributable risk is due to concentrations above 100 Bq/m³. When reducing exposure in case levels exceed 200 or 400 Bq/m³ to lower levels, a

tion dans les zones à fort potentiel radon. Sur la base de tels modèles, les options d'actions politiques pourraient être scénarisées et quantifiées en intégrant des hypothèses réalisistes sur les principaux facteurs déterminant le succès des stratégies d'actions destinées à réduire les niveaux de radon dans l'habitat. Il serait ainsi plus facile d'optimiser les choix politiques et techniques d'action contre le radon.

significant efficiency on the safety health impact in those regions is observed. On the basis of such models, policy choices could be drafted and quantified while introducing more realistic hypotheses on the main factors that can determine the success of action policies intended to reduce indoor radon levels. It would be easier to optimize policy and technical choices in terms of actions against radon.

Mots clés /Key words

Radon, évaluation des risques, régions françaises, expo domestiques / *Radon, risk assessment, French areas, home exposure*

Contexte

Nous passons 90 % de notre vie dans les bâtiments et le caractère cancérogène du radon est reconnu. Pourtant la nécessité de se protéger contre l'impact du radon dans l'habitat et le choix des seuils d'action n'ont pas fait l'unanimité au sein des décideurs des pays concernés (cf. article de Dessau et al dans ce numéro du BEH). Les raisons tiennent à l'histoire des pays, notamment à l'égard de la sphère privée, mais aussi pour une bonne partie à la marge laissée par les incertitudes apparentes de la connaissance autour de cette question : « si le radon est un cancérogène pulmonaire pour les situations d'expositions des ouvriers exposés dans les mines, l'est-il pour les niveaux et conditions d'exposition dans l'habitat ? » En France, la majeure partie de la population ne connaît pas l'existence du radon [1]. Même auprès des acteurs potentiels de la gestion, un débat persiste quant à son impact en termes de santé publique. L'enjeu est donc, dans les régions définies comme à potentiel radon, de faire connaître l'état des connaissances scientifiques sur le radon et ses effets, d'en illustrer l'impact sur la santé publique et de guider l'orientation des actions tout en permettant aux acteurs une appréciation des incertitudes associées. C'est dans ce contexte que différentes évaluations de risque sont menées par les Cellules interrégionales d'épidémiologie (Cire, Institut de veille sanitaire-InVS) et le Département santé environnement de l'InVS. L'objectif de cet article est d'expliquer les méthodologies employées, d'exposer les résultats, de les discuter en termes de fiabilité et d'utilité pour la gestion en se fondant sur les exemples des études réalisées en Bretagne et en Corse [1,2].

Méthode

Le processus passe par quatre étapes.

La première est l'identification des effets liés à l'exposition au radon. Les études épidémiologiques portant sur les cohortes de mineurs et les résultats des études expérimentales sont clairement en faveur d'un pouvoir cancérogène pulmonaire du radon [3,4,5]. Aucun autre effet propre au radon n'est mis en évidence. Contrairement à certaines études écologiques, les études cas-témoin chez les enfants ne suggèrent pas l'existence d'une relation

entre risque de leucémie et exposition cumulée au radon et il n'existe actuellement pas d'argument solide pour affirmer la causalité de cette relation [6]. **La deuxième est de quantifier la relation entre l'exposition cumulée au radon et le risque de cancer du poumon.** Les études sur les mineurs montrent une relation linéaire dont la pente est modifiée par l'âge atteint, le délai depuis l'exposition, ainsi que la durée ou le débit d'exposition. Récemment, les études conjointes cas-témoin en population générale ont montré une relation statistiquement significative pour des niveaux fréquemment rencontrés dans l'habitat, cohérente avec les résultats obtenus par le comité de l'Académie nationale des sciences aux États-Unis [5]. Sur la base de l'analyse conjointe des cohortes de mineurs, ce comité a proposé deux modèles pour estimer le risque de décès par cancer du poumon lié à l'exposition au radon en population générale. Ces modèles estiment un coefficient d'excès de risque relatif (RR) par unité d'exposition en prenant en compte l'âge atteint, le délai écoulé depuis l'exposition et, soit la durée de l'exposition, soit l'intensité de celle-ci. Pour les travaux réalisés en Bretagne et en Corse, seul le modèle exposition-âge-durée a été retenu [1,2].

L'exposition des habitants des régions Bretagne et Corse a été caractérisée sur la base des mesures existantes issues de la campagne de mesures effectuées dans l'habitat par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire et la Direction générale de la santé [1,2]. Pour fournir une représentation spatiale de la distribution du radon, les logements ont été sélectionnés sur la base du volontariat en respectant la règle d'une mesure par maille de 49 km². Chaque mesure, obtenue à partir d'un dosimètre passif Kodalpah LR115 posé deux mois dans le salon ou une chambre, était accompagnée d'un questionnaire renseignant sur la période de mesure, la commune et les caractéristiques de l'habitat mesuré. On disposait de 1113 mesures réalisées entre 1983 et 1998 pour la Bretagne et de 113 mesures réalisées entre 1995 et 1996 pour la Corse. L'influence des facteurs pouvant modifier les niveaux moyens de radon a été étudiée au moyen d'un modèle linéaire multivarié utilisant les résultats des mesures de radon log-transformées.

Pour la Bretagne, l'analyse de l'échantillon montre des concentrations en habitat collectif inférieures de 30 % à celles des pavillons ; et dans les pavillons, des mesures à l'étage plus basses de 20 % à celles du rez-de-chaussée. Pour la Corse, l'analyse indiquait une moyenne quatre fois supérieure pour les communes sur sol granitique, deux fois supérieure pour les logements pavillonnaires par rapport au collectif et enfin trois fois supérieure pour les mesures réalisées en hiver comparée aux autres mesures, toutes faites au printemps.

Pour la Bretagne, l'échantillon se composait de mesures régulièrement réparties sur l'ensemble du territoire, mais essentiellement en habitat pavillonnaire (96,5 %), et au rez-de-chaussée (79,6 %). Pour l'échantillon corse les mesures étaient surreprésentées dans l'habitat individuel et les zones granitiques. Une étude britannique sur l'impact des saisons sur les concentrations en radon, a permis, pour la Bretagne, d'obtenir une estimation de l'exposition moyenne annuelle. Cette étude n'étant pas transposable en Corse, cette estimation a été effectuée d'après les résultats de l'analyse multivariée.

Afin de pallier au manque de représentativité de chaque échantillon, les redressements ont porté sur les types d'habitat et les saisons pour les deux régions et pour la Corse sur la nature géologique des sols en raison du contraste très net observé quant à la distribution des niveaux de radon selon cette variable. La stratification de l'échantillon en fonction de ces caractéristiques a permis de créer un échantillon de mesures respectant la proportion respective de chacune des strates dans l'habitat régional à l'aide d'un modèle de Monte-Carlo. Pour caractériser l'exposition domestique au radon, il a été estimé que les particuliers passent 70 % de leur temps à domicile.

La caractérisation de l'impact a été réalisée à l'aide du modèle exposition-âge-durée du BEIR VI, qui permet d'estimer sur la vie entière un risque relatif (RR) de décéder d'un cancer du poumon. Les probabilités de décéder du cancer du poumon âge par âge sont calculées en se basant sur l'excès de risque de développer un cancer du poumon dû à une exposition à une concentration donnée de radon, les taux de mortalité toutes causes et de cancer du poumon, les probabilités de survivre

Tableau 1 Distribution des concentrations de radon dans l'habitat Breton et Corse, France
Table 1 Distribution of indoor radon concentrations in Brittany and Corsica, France

| Effectif | Moyenne Bq/m ³ | Écart-type | Moyenne géométrique Bq/m ³ | > 200 Bq/m ³ | > 400 Bq/m ³ | > 1 000 Bq/m ³ | Médiane Bq/m ³ |
|--|---------------------------|------------|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Distribution de l'échantillon brut en Corse, IRSN-DGS 1995-6 | | | | | | | |
| 113 | 197 | 296 | 110 | 23,0 % | 12,4 % | 1,8 % | 103 |
| Distribution de l'échantillon brut en Bretagne, IRSN-DGS 1987 | | | | | | | |
| 1 113 | 121 | 148 | 78,5 | 15,7 % | 4,6 % | 0,4 % | 72 |
| Distribution de l'échantillon redressé en Corse, (Fr 06) | | | | | | | |
| 103 126 | 134 | 191 | 79 | 17,9 % | 6,0 % | 0,7 % | 75 |
| Distribution de l'échantillon redressé en Bretagne, (Pi 01) | | | | | | | |
| 260 000 | 98,2 | 110,6 | 65,5 | 10,7 % | 2,2 % | 0,1 % | 65 |

jusqu'à l'âge défini et de décéder ensuite d'un cancer du poumon.

Il est alors possible de calculer pour une région, la proportion annuelle de décès par cancer du poumon liés à une concentration particulière de radon en sachant que comme le RR est proportionnel à l'exposition, cette proportion est égale au rapport du RR correspondant à l'exposition moyenne selon la formule : $(RR - 1) / RR$ compte tenu du fait que la prévalence de l'exposition est égale à 1 puisque tout le monde est exposé au radon. On appelle cette proportion la fraction de risque attribuable (FRA). Multipliée par le nombre de décès annuels par cancer du poumon de la région elle permet d'estimer le nombre de décès annuels attribuables au radon. Lorsque le profil d'exposition au radon de cette population est connu, il est possible d'évaluer la part de chaque classe d'exposition dans le risque et de proposer des scénarios de gains sanitaires. Il est aussi possible d'intégrer la part respective de l'effet du tabac et du radon. Le BEIR VI prend en compte cette interaction en considérant à tour de rôle les effets comme purement multiplicatifs ou en se basant sur les résultats des analyses stratifiées sur les fumeurs et les non-fumeurs des cohortes de mineurs. Ces derniers résultats sont d'ailleurs plutôt en faveur de l'existence d'une interaction de forme sub-multiplicative.

Résultats

Les distributions respectives du radon dans l'habitat sont données pour l'échantillon brut et redressé (tableau 1). Après redressement, la moyenne change peu en Bretagne mais de façon importante en Corse [1,2].

Les estimations de RR vie entière de décès par cancer du poumon sont données dans la figure 1. Il est ainsi possible de voir que si cet excès varie en fonction des caractéristiques démographiques de la population, cette variation est relativement faible.

La FRA et le nombre de décès annuels par cancer du poumon attribuables au radon par sexe ont été estimés pour les distributions brutes et redressées (tableaux 2 et 3). On observe ainsi pour des expositions moyennes à 98 Bq/m³ et à 197 Bq/m³, une FRA respectivement de l'ordre de 20 % et de 30 %

[1,2]. La FRA est très proche que l'on soit fumeur ou non sous l'hypothèse d'une interaction tabac/radon multiplicative (tableau 4) et beaucoup plus importante chez les non-fumeurs sous l'hypothèse de la validité des paramètres estimés sur l'analyse stratifiée fumeurs et non fumeurs chez les mineurs (tableau 4). Par contre le taux de base de décès par cancer du poumon étant nettement plus faible chez les femmes et les non fumeurs, le nombre de décès qui seraient attribuables à l'exposition domestique au radon est beaucoup plus faible dans ces catégories.

Un élément intéressant pour aider à la gestion est l'analyse de la contribution des différentes tranches d'exposition. Le calcul de la répartition de la proportion de décès attribuables au radon réalisée à titre d'exemple chez les hommes en Bretagne et sur l'ensemble de la population en Corse selon les plages d'exposition montre qu'au moins 50 % du risque est attribuable aux concentrations supérieures à 100 Bq/m³. Par ailleurs, on peut voir (figures 2-3) qu'une bonne partie de l'impact est présent dans les habitations ayant des valeurs supérieures à 200 Bq/m³ [1,2].

Pour la Corse deux scénarios d'action collective ont été réalisés en regardant le gain sanitaire attendu si

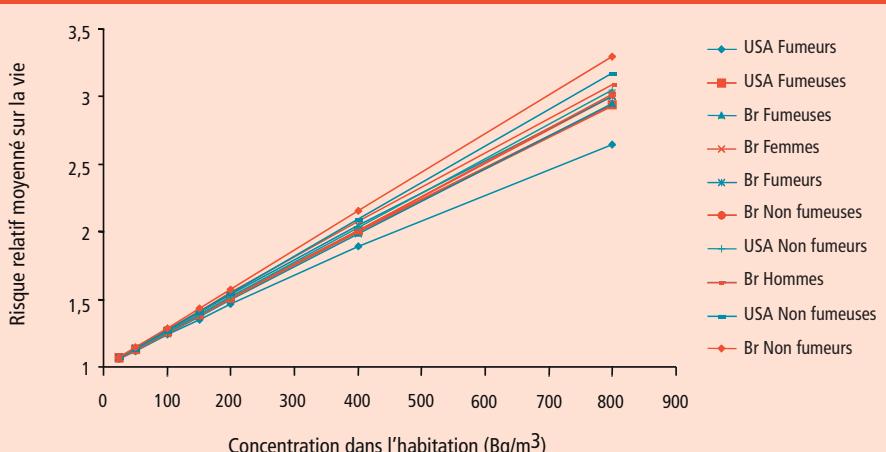
l'on ramène les expositions supérieures à 400 Bq/m³ entre 200 et 400 Bq/m³ et les expositions supérieures à 150 Bq/m³ entre 100 et 150 Bq/m³. Ils montrent qu'on éviterait respectivement de 17,5 % à 29,1 % et de 40,9 à 53,5 % des décès attribuables au radon [2] (figure 5).

Discussion

Nous sommes en présence d'un risque individuel qui bien que plus faible que celui du tabac est lié à une exposition au radon omniprésente pour le public (la prévalence de l'exposition est égale à 1) et chronique sur la vie entière. Dans les régions où la fréquence des habitations présentant des niveaux élevés de radon est importante, comme la Bretagne et la Corse, le radon causerait plus de 20 % des décès annuels par cancer du poumon. Or des moyens existent pour réduire l'exposition. C'est donc un des problèmes de santé publique importants dans le domaine de la santé environnementale. Cependant la FRA apparaît encore abstraite aux décideurs qui appréhendent plus facilement un nombre de morts. Les indicateurs produits permettent aussi de prioriser les actions. D'un point de vue de santé publique, il apparaît plus efficace de diminuer les niveaux de radon dans les foyers des fumeurs ou en agissant efficacement contre le tabac en raison de l'interaction des deux facteurs de risque. Les résultats montrent aussi que réduire l'exposition lorsque les concentrations sont comprises entre 200 et 400 Bq/m³ a une efficacité notable sur l'impact collectif dans les zones à fort potentiel radon.

Construit en 1999, le modèle du BEIR VI est un de ceux qui tient le mieux compte de l'état actuel des connaissances scientifiques sur le sujet pour extraire un risque aux « faibles expositions » ou d'une population à l'autre [7]. Deux modèles sont proposés par le BEIR VI ; le modèle âge-période durée et le modèle âge-période-concentration sans que le BEIR VI ne tranche entre les deux. Le deuxième

Figure 1 Distribution du risque relatif de décéder d'un cancer du poumon en Bretagne et aux États-Unis, selon les concentrations moyennes d'exposition cumulée vie entière / Figure 1 Distribution of the relative risk of dying from lung cancer (Brittany and USA) according to mean concentrations of cumulated lifelong exposure



Hypothèses : taux de mortalité générale et spécifique observés en Bretagne en 1990, temps de présence de 70 % au domicile, facteur d'équilibre de 0,4 / Hypotheses: General and specific mortality rates observed in Brittany in 1990, 70% time of indoor presence, 0,4 balance factor.

Tableau 2 FRA et nombre annuel de morts par cancer du poumon au sein de la population bretonne, attribuable à l'exposition au radon, modèle BEIR VI âge-période-durée, par sexe
Table 2 FRA and annual number of lung cancer deaths attributable to radon exposure in the Breton population, BEIR VI model, age-period-duration, by sex

| | Moyenne exposition : 98 Bq/m ³ | | Moyenne exposition : 121 Bq/m ³ | |
|--------|---|-----|--|-----|
| Hommes | 19,8 % | 162 | 23,4 % | 194 |
| Femmes | 18,5 % | 23 | 22,0 % | 27 |

Les intervalles de confiance ne sont pas disponibles.

Tableau 3 FRA et nombre annuel de morts par cancer du poumon au sein de la population corse, attribuable à l'exposition au radon, modèle BEIR VI exposition-âge-durée, par sexe / Table 3 FRA and annual number of lung cancer deaths attributable to radon exposure in the Corsican population, BEIR VI model, exposure-age-duration, by sex

| Sous groupes | Moyenne exposition : 134 Bq/m ³ | | Moyenne exposition : 197 Bq/m ³ | |
|--------------|--|---------------------------|--|---------------------------|
| | % décès attribuable | Nombre décès attribuables | % décès attribuable | Nombre décès attribuables |
| Homme | 21,3 | 28,3 | 28,0 | 37,2 |
| Femme | 22,6 | 5,0 | 29,6 | 6,5 |
| Total | 21,5 | 33,3 | 28,2 | 43,7 |

modèle aurait donné des estimations légèrement supérieures. Pour des raisons pédagogiques il a semblé peu coût efficace de noyer les acteurs destinataires des études sous une multiplication de résultats. Nous avons donc choisi de ne présenter que les résultats issus du modèle âge-période-durée, afin de n'être pas accusés dans le contexte français de jouer le rôle d'alarmistes. Les québécois [8] ont pris l'option inverse dans leur avis scientifique pour leur pays en s'appuyant au contraire sur le principe de prudence. Les deux choix auraient été scientifiquement également valables. Les résultats des études cas-témoin publiés récemment confirment a posteriori la validité de ces modèles pour extrapoler d'une population masculine et jeune à la population générale. Il est maintenant établi que la relation est valable pour des niveaux fréquemment rencontrés en population générale. De plus aujourd'hui les résultats accumulés à l'issue des études menées sur l'animal, puis sur les mineurs, puis en population générale sont nettement en faveur de l'existence d'une relation causale réelle entre exposition cumulée au radon et risque de cancer du poumon pour des niveaux moyens fréquemment atteints en population générale (entre 100 et 200 Bq/m³). Aussi même s'il n'est scientifiquement pas possible d'écartier toute possibilité d'un seuil ou d'une relation exposition-effet non linéaire aux très faibles expositions, les figures 2 et 3 montrent que même si le radon n'était plus cancérogène en dessous de 100 Bq/m³, il n'en resterait pas moins parmi les principaux facteurs de cancer du poumon connus dans les régions à fort potentiel.

Compte tenu de l'importance du tabac dans la survenue de cancers du poumon, la connaissance

de la forme de l'interaction tabac-radon et du comportement tabagique des populations exposées sont des éléments primordiaux de l'estimation. De plus, le calcul du risque vie entière suppose que la structure démographique et les profils de mortalité générale et spécifique resteront les mêmes dans le futur. Ceci est peu probable car les habitudes tabagiques, facteur de risque principal du cancer du poumon, sont en pleine mutation en France. Enfin, persistent encore les incertitudes liées à l'effet des expositions aux premiers âges.

Une source d'incertitude importante dans les estimations régionales réside dans le fait que les échantillons disponibles sont trop petits et trop

biaisés pour permettre une caractérisation satisfaisante de la distribution de l'exposition. Il est donc nécessaire de redresser les échantillons en fonction de l'information disponible qui n'est pas forcément la même d'une région à l'autre. Si l'expertise permet de garantir que les valeurs redressées sont plus proches de la réalité pour ce qui est de la moyenne, l'incertitude sur la proportion des concentrations fortes est nettement plus grande. Le résultat final est toujours insatisfaisant d'un point de vue scientifique.

L'estimation du temps passé à domicile (70 % de la vie) semble tout à fait réaliste au vu des enquêtes de l'Insee, et l'hypothèse du nombre moyen d'occupants constant par logement est proche de la réalité et peut variable d'une région à l'autre. Par contre l'estimation de la distribution de l'exposition cumulée ne tient pas compte des déménagements successifs au cours de la vie qui devraient resserrer les écarts vers la moyenne. Les mesures actuelles de radon ne reflètent pas forcément les concentrations de radon rencontrées tout au long des années du fait de l'évolution des caractéristiques de l'habitat qui pourraient entraîner une augmentation ou une baisse de ces concentrations. Actuellement certaines études travaillent sur de nouvelles méthodes de mesure de l'exposition cumulée au radon qui devraient permettre d'en donner une meilleure estimation et donc de préciser la relation entre exposition domestique et cancer du poumon. Un projet d'analyse conjointe de toutes les études cas-témoin existantes devrait donner la puissance suffisante pour travailler plus particulièrement sur l'interaction tabac-radon ou sur les facteurs dépendants du temps. A l'époque de la réalisation des études régionales présentées ci-dessus, les experts du BEIR VI jugeaient l'estimation d'un intervalle comme un faux indicateur de fiabilité compte tenu de l'incertitude quant à l'extrapolation de la relation d'une population à l'autre. Les

Tableau 4 FRA et nombre annuel de morts par cancer du poumon au sein de la population corse (fumeurs/non fumeurs), attribuable à l'exposition au radon, modèle BEIR VI exposition-âge-durée, par sexe / Table 4 FRA and annual number of lung cancer deaths attributable to radon exposure in the Corsican population (smokers/non smokers), BEIR VI model, exposure-age-duration, by sex

| Sexe | Moyenne exposition : 134 Bq/m ³ | | Moyenne exposition : 197 Bq/m ³ | |
|---|--|---------------------------|--|---------------------------|
| | % décès attribuable | Nombre décès attribuables | % décès attribuable | Nombre décès attribuables |
| Extrapolation des coefficients doses-réponse sur fumeurs et non fumeurs : interaction multiplicative | | | | |
| Homme fumeurs | 20,9 | 26,61 | 27,6 | 35,1 |
| Femmes fumeuses | 22,4 | 3,50 | 29,3 | 4,58 |
| Fumeurs | 21,1 | 30,11 | 28,0 | 39,7 |
| Homme non fumeurs | 22,1 | 1,26 | 29,0 | 1,7 |
| Femmes non fumeuses | 22,7 | 1,45 | 29,7 | 1,9 |
| Non fumeurs | 22,4 | 2,71 | 29,3 | 3,6 |
| Extrapolation des coefficients doses-réponse stratifiée sur fumeurs et non fumeurs sur cohortes de mineurs | | | | |
| Homme fumeur | 19,5 | 24,80 | 25,8 | 32,8 |
| Femme fumeuse | 20,9 | 3,26 | 27,5 | 4,3 |
| Fumeurs | 19,6 | 28,02 | 26,0 | 37,1 |
| Homme non fumeur | 35,3 | 2,02 | 43,9 | 2,5 |
| Femme non fumeuse | 36,0 | 2,30 | 44,6 | 2,8 |
| Non fumeurs | 35,7 | 4,31 | 44,3 | 5,4 |

Figure 2 Analyse de la contribution au risque chez les hommes sur la base de la distribution redressée bretonne / Figure 2 Analysis of risk contribution in men on the basis of the Breton adjusted distribution

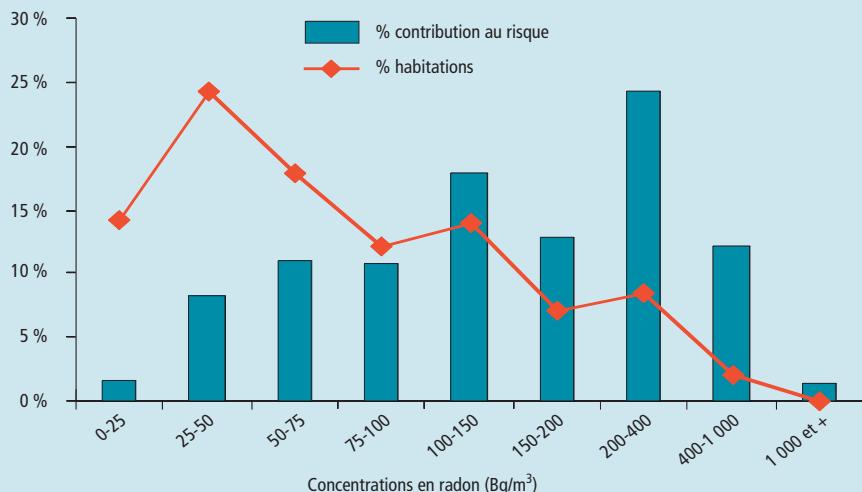
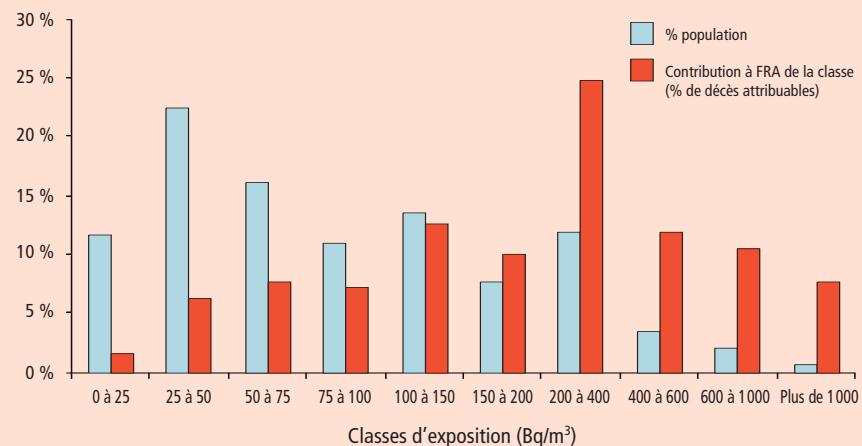


Figure 3 Contribution au risque des différentes classes d'exposition hommes et femmes confondus, données redressées d'exposition, Corse, France / Figure 3 Risk contribution to the different types of male/female exposures, adjusted exposure data, Corsica, France



résultats des études cas-témoin poolées devraient permettre de produire avec plus de crédibilité cet intervalle d'incertitude.

Pour l'estimation de l'exposition, les voies d'amélioration sont aussi régionales. De nouvelles campagnes avec tirage au sort des habitats mesurés, stratifiées pour cibler les parties mal connues de la distribution, sont nécessaires. Les distributions représentatives ainsi obtenues devraient renforcer la fiabilité des estimations de l'efficacité des différents scénarios d'actions envisagés. Le protocole adopté pour la campagne de mesure du radon dans la région Franche-Comté, pour obtenir un échantillon au 1/1000 en vue de caractériser l'exposition et le risque sur ce territoire, a été retenu. Une campagne spécifique sur l'effet saison y est associée.

De même, la réalisation de mesures devrait être renforcée dans les bâtiments publics et menée sur les lieux de travail (où l'on passe 20 % de son temps). L'évolution récente et future de la réglementation française va entraîner la production de mesures normées de radon dans ces lieux. Les premiers résultats de mesures dans les établissements scolaires corses, bretons et franc-comtois, même s'ils ne respectent pas un plan de sondage forcément adéquat, semblent confirmer les niveaux mesurés dans l'habitat privé.

Les scénarios doivent être renforcés par des hypothèses sur l'efficacité des mesures de dépistage par rapport à un seuil, sur le taux de couverture des campagnes de mesure, sur le taux de compliance des particuliers à la réalisation des actions de réduction des niveaux de radon, sur l'efficacité des différentes options envisagées afin de permettre d'orienter les actions. Par exemple les résultats qui donnent actuellement une préférence à l'action sur les fumeurs pourraient être modulés si la compliance à l'action est au contraire plus forte chez les non fumeurs etc... Il est possible de monétariser l'ensemble des étapes y compris le coût des jours de vie épargnés afin de calculer le coût d'une politique radon dans une région. Enfin les scénarios devraient aussi intégrer certaines hypothèses sur l'évolution du tabagisme dans le temps dans la région et sur le temps d'occupation des logements. L'ensemble de ces informations permettrait d'optimiser les choix politiques et techniques d'action contre le radon. Un tel travail est envisagé dans le cadre de l'analyse réalisée sur les résultats des mesures en Franche-Comté.

La réalisation de telles évaluations par les acteurs régionaux permet à tous de s'approprier l'importance du risque radon. C'est ainsi que le radon a été intégré comme priorité d'action dans le plan régional de santé publique de Bretagne et que des moyens sont attribués pour faciliter le dépistage et les travaux dans les bâtiments pour réduire les niveaux de radon.

Tableau 5 Gains sanitaires annuels attendus au sein de la population corse, en fonction de différents scénarios de réduction de l'exposition, données brutes et redressées d'exposition, Corse, France
Table 5 Annual health benefits expected in the Corsican population, depending of various exposure reduction scenarios, crude and adjusted exposure data, Corsica, France

| Scénarios | Gains sanitaires (nombre de décès évités) | | | |
|---|---|--------|----------------------------|--------|
| | Sur distribution brute | | Sur distribution redressée | |
| | Nombre | % | Nombre | % |
| Gain sanitaire attendu en ramenant toutes les expositions supérieures à 400 Bq/m ³ à la valeur moyenne de la classe 200 et 400 Bq/m ³ | 12,6 | 29,1 % | 5,8 | 17,5 % |
| Gain sanitaire attendu en ramenant toutes les expositions supérieures à 150 Bq/m ³ à la valeur moyenne de la classe 100 et 150 Bq/m ³ | 23,1 | 53,5 % | 13,4 | 40,9 % |

Le développement d'une expertise et de la production d'informations permettant d'évaluer des scénarios réalistes au niveau régional constituerait un fondement rationnel au choix d'une politique en intégrant l'impact sanitaire dans les options d'action au même titre que l'arsenal réglementaire, financier, culturel, et que les affinités éthiques (ex. actions chez les fumeurs/les non fumeurs) ou politiques contemporaines. Le Québec a déjà fondé son action sur de telles estimations [8]. Parallèlement une politique de répétition de campagnes de mesures représentatives dans le temps et de suivi des actions entreprises devrait être systématiquement mise en place en parallèle du lancement d'une politique d'action contre le radon. Un tel travail devrait permettre de montrer l'évolution des niveaux de radon dans le parc de logements au cours du temps.

Enfin, de telles méthodes permettent aussi d'orienter la stratégie d'action au niveau national en permettant de mesurer l'efficacité attendue des différentes options imaginées (ciblage de régions, actions sur l'habitat existant, actions sur l'habitat en construction etc...).

Références

- [1] Pirard P, Hubert P. Le radon en Bretagne : évaluation de l'exposition et du risque associé. 2000; Note technique DPHD/SEGR/00-79-Indice 1.
- [2] Franke F, Pirard P. 2006 Le radon en Corse : évaluation de l'exposition et des risques associés. http://www.invs.sante.fr/publications/2006/radon_corse/radon_corse.pdf
- [3] Lubin JH, Boice JD, Jr., Edling C, Hornung RW, Howe G, Kunz E et al. Radon and lung cancer risk: a joint analysis of 11 underground miners studies. N.I.H. publication n° 94-3644. 1994. Washington D.C. U.S. Department of Health and Human Services, National Institute of Health, National Cancer Institute.
- [4] Darby SC, Whitley E, Howe GR, Hutchings SJ, Kusiak RA, Lubin JH et al. Radon and cancers other than lung cancer in underground miners: a collaborative analysis of 11 studies. *J.Natl.Cancer Inst.* 1995; 87(5):378-84.
- [5] National Research Council. *Health Effects of Exposure to Radon: BEIR VI.* 1999.
- [6] Laurier D, Valenty M, Tirmarche M. Radon exposure and the risk of leukemia: a review of epidemiological studies. *Health Physics.* 2001; 81(3):272-88.
- [7] Darby S, Hill D, Auvine A, Barros-Dios JM, Baysson H, Bochicchio F, Deo H, Falk R, Forastiere F, Hakama M, Heid I, Kreienbrock L, Kreuzer M, Lagarde F, Makelainen I, Muirhead C, Oberaigner W, Pershagen G, Ruano-Ravina A, Ruosteenoja E, Rosario AS, Tirmarche M, Tomasek L, Whitley E, Wichmann HE, Doll R. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *British Medical Journal* 2005; 330(7485):223. Epub 2004 Dec 21.
- [8] Dessau JC, Gagnon F, Lévesque B, Prévost C, Leclerc JM, Belles-Isles JC. 2006. Le radon au Québec - Évaluation du risque à la santé et analyse critique des stratégies d'intervention - Document synthèse.

Le contrôle des expositions au radon, France, Décembre 2006

Jean-Luc Godet (jean-luc.godet@asn.fr), Marie-Line Perrin, Eric Dechaux, Cyril Pineau

Autorité de sûreté nucléaire, Paris, France

Résumé/Abstract

Pour la population française, l'exposition au radon constitue, avec l'exposition médicale, la première source d'exposition aux rayonnements ionisants. Le radon est un cancérogène pulmonaire certain pour l'homme : il est classé dans le groupe I dans la Classification du centre international de recherche sur le cancer (Circ). Selon les estimations disponibles, le nombre estimé de cancers du poumon attribuable à une exposition au radon en France se situe loin derrière celui dû au tabac. Cependant, selon une dernière étude européenne, environ 9 % des cancers du poumon en Europe seraient dus au radon¹. Ainsi, le nombre de personnes exposées fait du radon un problème de santé publique sur lequel il est nécessaire d'agir, d'autant plus que les expositions peuvent être nettement diminuées par des moyens souvent simples. A partir de 2002, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) s'est attachée à mettre en place le nouveau cadre réglementaire relatif à la gestion du risque lié au radon dans les lieux ouverts au public. Le nouveau dispositif mis en place est maintenant totalement opérationnel.

De plus, en s'appuyant sur les actions retenues par le Gouvernement en juin 2004 dans le plan national santé environnement (PNSE), l'ASN a élaboré en 2005, en concertation avec le ministère chargé de l'urbanisme et de la construction, un plan d'actions interministériel 2005-2008 destiné à coordonner les actions des différents organismes nationaux engagés dans ce domaine. Ce plan est organisé autour de 3 axes :

- construire une nouvelle politique pour la gestion du risque lié au radon dans l'habitat existant et les constructions neuves ;
- accompagner et contrôler la mise en œuvre de la réglementation pour la gestion du risque lié au radon dans les lieux ouverts au public ;
- améliorer et diffuser les connaissances sur les expositions et le risque lié au radon.

Controlling exposure to radon, France, December 2006

Exposure to radon, along with medical exposure, is the leading source of the French population's exposure to ionizing radiation. Radon is a confirmed cause of lung cancer in man (classified in group I by the International Agency for research on Cancer (IARC)).

According to available estimates, the numbers of lung cancers attributable to radon exposure in France are far fewer than those caused by tobacco. However, according to a recent European study, around 9% of lung cancers in Europe may be caused by radon¹. Thus, due to the number of people exposed, radon has become a public health issue which calls for action, considering that exposure can be significantly reduced by implementing measures which are often simple.

Since 2002, the Nuclear Safety Authority (ASN) has proceeded in implementing a new regulatory framework for the risk management related to the presence of radon in public places. The new system is now fully operational. In addition, based on the initiatives adopted by the government in June 2004 in the context of the National Health and Environment Plan (PNSE), the ASN drew up a plan in 2005, in collaboration with the Ministry for Urban Planning and Construction, to coordinate the actions of various national bodies involved in this field.

This three-pronged strategy is as follows:

- Creation of a new risk management policy related to the presence of radon in existing homes and in new buildings;
- Supporting and controlling the implementation of regulations for managing radon related risks in public places;
- Improvement and dissemination of knowledge on radon exposure and its related risks.

Mots clés/Key words

Exposition au radon, cancers du poumon, PNSE et plan d'actions / Exposure to radon, lung cancers, PNSE and action plan

¹ « Radon in homes in risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies », S. Darby, D. Hill, M. Tirmarche, and al, *British Medical Journal*, 2005.

Risque lié au radon

Pour la population française, l'exposition au radon constitue, avec l'exposition médicale, la première source d'exposition aux rayonnements ionisants. Le radon est un cancérogène pulmonaire certain pour l'homme : il est classé dans le groupe I dans la classification du Centre international de recherche sur le cancer (Circ). Selon les estimations disponibles, le nombre estimé de cancers du poumon attribuable à une exposition au radon en France se situe loin derrière celui dû au tabac. Cependant, depuis 2003, la mise en évidence du risque lié au radon domestique (population générale) a sensiblement progressé avec notamment la publication de deux études épidémiologiques. La première, européenne [1 et page 149 de ce BEH pour une version française], a été menée conjointement dans neuf pays dont la France. De par sa puissance statistique, elle a permis de confirmer l'existence d'une relation linéaire significative entre l'exposition domestique au radon et le risque de décès par cancer du poumon. Celui-ci s'accroît de 8 % (IC 95 % = 3-16) pour une augmentation de 100 Bq/m³ de radon mesuré, après ajustement sur l'âge, le sexe, la région de résidence et le statut tabagique. À exposition égale, la probabilité de développer un cancer du poumon est plus élevée chez les fumeurs que chez les personnes n'ayant jamais fumé. Ainsi, l'exposition au radon serait responsable d'environ 9 % des cancers du poumon en Europe. La seconde, nord-américaine [2], qui comporte elle aussi une reconstitution détaillée de l'historique tabagique de chacun des individus, aboutit aux mêmes résultats (augmentation de 11 % pour 100 Bq/m³ (IC 95 % = 0-28)). Enfin, l'Institut de radioprotection et sûreté nucléaire - IRSN vient de mener une réflexion méthodologique pour mieux prendre en compte les incertitudes associées à l'évaluation du risque dû au radon domestique et l'a utilisée pour recalculer ce risque à l'échelle de la France [3]. Ainsi, le nombre de

Tableau 1 Nombre d'organismes agréés pour la campagne de mesure 2006-2007
Table 1 Number of certified bodies for 2006-2007 measurement campaign

| | Nombre d'organismes agréés jusqu'au 15 septembre 2007 | Nombre d'organismes agréés jusqu'au 15 septembre 2008 | Nombre d'organismes agréés jusqu'au 15 septembre 2009 |
|----------|---|---|---|
| Niveau 1 | 37 | 21 | 22 |
| Niveau 2 | 5 | 3 | |

personnes exposées fait du radon un problème de santé publique sur lequel il est nécessaire d'agir, d'autant plus que les expositions peuvent être nettement diminuées par des moyens souvent simples (figure 1).

Actions réglementaires de l'ASN depuis 2002

A partir de 2002, l'ASN s'est attachée à mettre en place le nouveau cadre réglementaire relatif à la gestion du risque lié au radon dans les lieux ouverts au public. Le nouveau dispositif mis en place est maintenant totalement opérationnel : les campagnes de mesures du radon, réalisées entre septembre et avril, sont confiées à des organismes agréés qui réalisent les mesures selon les normes publiées par l'Association française de normalisation (Afnor) (tableau 1).

La liste des 31 départements prioritaires et les catégories d'établissements où doivent être réalisées les mesures ont été publiées, les Directions départementales des affaires sanitaires et sociales (Ddass) étant chargées d'établir localement la liste nominative de ces établissements.

Plan d'actions interministériel 2005-2008

En s'appuyant sur les actions retenues par le Gouvernement en juin 2004 dans le plan national santé

environnement (PNSE), l'ASN a élaboré en 2005, en concertation avec le ministère chargé de l'urbanisme et de la construction, un plan destiné à coordonner les actions des différents organismes nationaux engagés dans ce domaine, tels que l'IRSN, l'Institut de veille sanitaire (InVS) et le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), mais aussi de favoriser les initiatives régionales permettant de renforcer les compétences des acteurs locaux. Ce plan est organisé autour de 3 axes :

- construire une nouvelle politique pour la gestion du risque lié au radon dans l'habitat existant et les constructions neuves ;
- accompagner et contrôler la mise en œuvre de la réglementation pour la gestion du risque lié au radon dans les lieux ouverts au public ;
- améliorer et diffuser les connaissances sur les expositions et le risque lié au radon.

Gestion du risque lié au radon dans l'habitat existant et les constructions neuves

Le PNSE fixe dans ses priorités la gestion du risque lié au radon dans l'habitat au motif que l'exposition peut y être élevée du fait du temps de séjour particulièrement long, en comparaison au temps passé par exemple sur les lieux de travail.

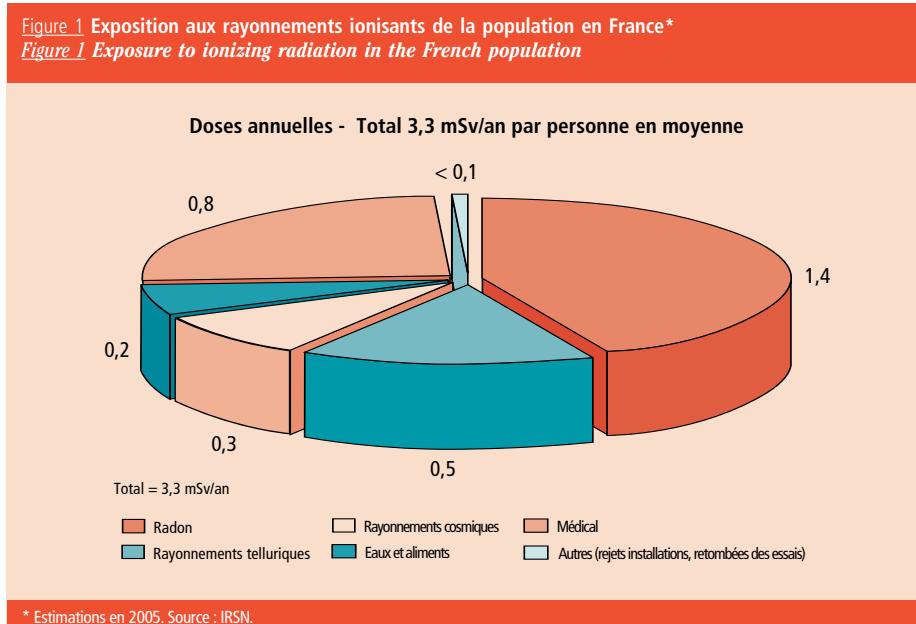
Un groupe de travail a été constitué afin d'identifier les mécanismes d'aide susceptibles de favoriser la réduction des niveaux de radon dans l'habitat existant, mais aussi d'engager une étude de faisabilité sur l'intégration de la mesure du radon dans le dossier de diagnostic technique de l'habitat exigé lors des transactions immobilières. Pour les habitations neuves situées dans les départements prioritaires, une action, réalisée actuellement avec le CSTB, conduira à élaborer des normes constructives pour limiter les concentrations en radon.

Enfin, des actions de formation et d'information sont réalisées en direction des professionnels du bâtiment dans le but de mieux structurer les offres de travaux à réaliser après un dépistage mettant en évidence des concentrations élevées en radon.

Contrôle et le suivi de la réglementation dans les lieux ouverts au public

Une première campagne réalisée entre 1999 et 2002 avait permis de faire des dépistages dans plus de 13 000 établissements ouverts au public, en

Figure 1 Exposition aux rayonnements ionisants de la population en France*
Figure 1 Exposure to ionizing radiation in the French population



* Estimations en 2005. Source : IRSN.

particulier des établissements scolaires. Le bilan de ces mesures, publié en 2003 par l'ASN, permettait d'effectuer un premier repérage des établissements non-conformes : 8 % des établissements contrôlés présentaient des concentrations en radon dans l'air comprises entre 400 et 1 000 Bq/m³, et pour 4 % la valeur de 1 000 Bq/m³ était dépassée.

Pour la campagne 2005-2006, sur 3 149 établissements ayant fait l'objet d'un dépistage :

- 2 726, soit environ 87 %, présentent une activité en radon inférieure à 400 Bq/m³ ;
- 334, soit environ 10 % présentent une activité en radon comprise entre 400 et 1 000 Bq/m³ ;
- 89, soit environ 3 %, présentent une activité supérieure à 1 000 Bq/m³.

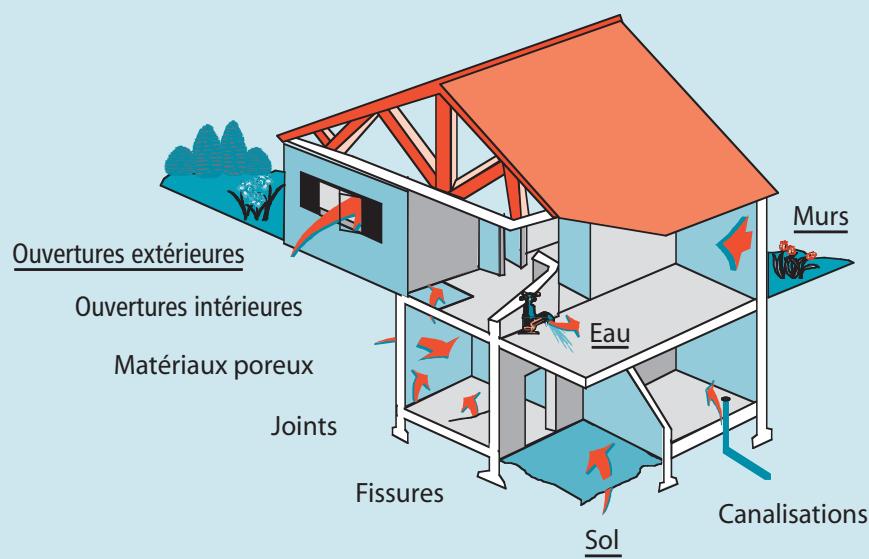
Un accent particulier est mis sur le suivi, par les Ddass, des établissements non-conformes afin de s'assurer de la mise en place effective d'actions de remédiation. Dans le cadre des agréments qu'elle délivre, l'ASN organise également un contrôle des organismes agréés dans le but de vérifier la qualité des prestations de mesures qu'ils réalisent.

La mise à jour des zones prioritaires pour la mesure du radon, à partir de critères nationaux à définir, constitue également une action importante afin de compléter, voire de corriger, la liste des 31 départements prioritaires publiée en 2004, en prenant en compte les parties de départements ignorées par cette classification. L'IRSN réalise actuellement une étude basée sur la compilation et l'exploitation des données géologiques nationales existantes, en intégrant la connaissance lithologique, géochimique et structurale des roches et visant à estimer le « potentiel source et d'émission du radon des terrains ».

Connaissances sur les expositions et le risque lié au radon

L'amélioration et la diffusion des connaissances sur les expositions au radon et sur le risque associé

Figure 2 Voies d'entrée et de transfert du radon dans une habitation
Figure 2 Entrance and transfer channel of radon in a house



Source : IRSN-MCR.

sont étroitement liées à la mise en place d'un système d'information adapté. A l'initiative de la direction générale de la santé, une base de données « Appliradon » permet actuellement la saisie des mesures et sera intégrée à terme à la nouvelle base de données en cours de construction (Sise-Habitat), permettant une meilleure connaissance des expositions dans les bâtiments. Dans ce cadre, l'ASN financerà, en 2007, la saisie des données radon disponibles sur la base de données « Appliradon ».

Le plan d'actions interministériel identifie enfin des actions en matière de stratégie d'information vis-à-vis du public et des études à mettre en place pour améliorer la connaissance du risque lié au radon et sa gestion, en favorisant notamment les études de caractérisation du risque de cancer

du poumon dans les régions les plus exposées (figure 2).

Références

- [1] Darby S, Hill D, Auvinen A, Barros-Dios JM, Baysson H, Bochicchio F, Deo H, Falk R, Forastiere F, Hakama M, Heid I, Kreienbrock L, Kreuzer M, Lagarde F, Makelainen I, Muirhead C, Oberaigner W, Pershagen G, Ruano-Ravina A, Ruosteenaja E, Rosario AS, Tirmarche M, Tomasek L, Whitley E, Wichmann HE, Doll R. Radon in homes and risk of lung cancer; Collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ*. 2005.
- [2] Kreski D, Lubin JH, Zielinski JM, Alavanja M, Catan VS, Field RW, Klotz JB, Letourneau EG, Lynch CF, Lyon JL, Sandler DP, Schoenberg JB, Steck DJ, Stolwijk JA, Weinberg C, Wilcox HB. Residential radon and risk of lung cancer: a combined analysis of 7 North American case-control studies. *Epidemiology*. 2005.
- [3] Catelinois O, Rogel A, Laurier D, Billon S, Hemon D, Verger P, Tirmarche M. Lung cancer attributable to indoor radon. Exposure in France: impact of the risk models and uncertainty analysis. *EHP*, 2006.

La politique de gestion du radon au Québec

Jean-Claude Dessau (Jean-Claude_Dessau@ssss.gouv.qc.ca)¹, Fabien Gagnon¹, Benoît Lévesque¹, Claude Prévost², Jean-Marc Leclerc¹

1 / Institut national de santé publique du Québec 2 / Institut national de santé publique du Québec

Résumé/Abstract

En l'absence d'une politique provinciale sur le radon, la Direction générale de la santé publique du ministère de la Santé et des Services sociaux du Québec (MSSS) a mandaté l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) pour procéder à l'évaluation de ce dossier à l'échelle provinciale. Le groupe de travail qui fut formé avait principalement pour tâche à travers une démarche d'analyse de risque, de faire le point sur le risque à la santé attribuable au radon résidentiel au Québec.

Le présent article fait état, entre autres, des principaux aspects traités dans l'avis publié en 2004 par ce groupe de travail.

Radon gas management policy in Quebec

In the absence of a provincial policy on radon, the Direction générale de la santé publique du ministère de la Santé et des Services sociaux du Québec (MSSS) gave the mandate to the Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) to carry out the evaluation of this issue on a provincial scale. The formed working group had the main task to assess health risks associated to residential radon in Quebec through a risk analysis approach. This article presents the principal aspects treated in the scientific report

Il décrit d'abord les concentrations de radon mesurées dans les domiciles au Québec. Il expose ensuite une analyse de risque en se basant sur un des modèles conçus par le comité du BEIR VI. Selon cette analyse, le radon expliquerait environ 10 % des décès par cancer du poumon, soit environ 430 des 4 101 décès attribuables chaque année au Québec à ce type de cancer. Par la suite il porte un regard sur les différentes stratégies d'intervention mises de l'avant à travers le monde. Il procède ensuite à l'analyse des stratégies d'intervention qui sont envisageables pour le Québec et les recommandations que le groupe de travail a tiré de cette analyse, en particulier deux d'entre elles qui étaient jugées les plus prometteuses, soit l'adoption de mesures préventives dans le Code de construction du Québec et le dépistage du radon dans les bâtiments publics (établissements scolaires, garderies, etc.).

Enfin, il expose les travaux effectués au niveau fédéral sur la révision de la ligne directrice canadienne qui était fixée à 800 Bq/m³ depuis 1988. Cette ligne directrice a été remise en question et le Bureau fédéral de radioprotection a fait une proposition au ministre de la santé du Canada de l'abaisser à 200 Bq/m³. On prévoit que l'annonce de cette mesure sera faite au printemps 2007.

Mots clés / Key words

Radon, cancer du poumon, analyse de risque, stratégies d'intervention / Radon, lung cancer, risk analysis, intervention policies

Introduction

À la lumière des dernières connaissances qui ont fait du radon un important contaminant environnemental en termes de risque sanitaire, de l'intérêt grandissant pour cette problématique et considérant l'absence d'une politique provinciale sur le sujet, la Direction générale de la santé publique du ministère de la Santé et des Services sociaux (MSSS) a mandaté l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) pour procéder à l'évaluation de ce dossier à l'échelle provinciale.

Avis scientifique au ministère de la Santé et des Services sociaux

Le groupe de travail qui fut formé avait principalement pour tâche de faire le point sur le risque à la santé attribuable au radon résidentiel, d'évaluer le risque à la santé au regard des concentrations connues dans les habitations au Québec, de faire l'inventaire des principales mesures de santé publique existantes à travers le monde et d'analyser les différentes stratégies d'intervention pour en tirer des recommandations pour le ministère de la Santé et des Services sociaux. Le présent article fait état, entre autres, des principaux aspects traités dans l'avis publié en 2004 par ce groupe de travail¹ et des suites données à ses recommandations.

Le radon au Québec

Concentrations de radon mesurées au Québec

Les premières mesures québécoises de radon ont été prises au début des années 1980 par le ministère de l'Environnement. Une étude visant à définir l'exposition résidentielle au Québec a par la suite été réalisée en 1992-93 sur environ 900 maisons à l'échelle provinciale [6]. Les moyennes géométriques annuelles des concentrations mesurées étaient de 34,6 Bq/m³ (n = 781) dans les soubassements et de 18,0 Bq/m³ (n = 616) au rez-de-chaussée.

Certains secteurs, tels que ceux présentant une formation géologique propice à émettre du radon [8], sont susceptibles de présenter des concentrations nettement plus élevées que la moyenne québécoise.

Mis à part ces secteurs, les teneurs mesurées au Québec demeurent relativement faibles et se comparent aux valeurs moyennes mesurées dans plusieurs pays. Il a été possible d'estimer, à partir de l'information disponible sur le parc immobilier québécois en 1991 (soit un total d'environ 1 470 000 habitations en excluant les logements) et de la distribution des concentrations mesurées au rez-de-chaussée dans l'étude de Lévesque et coll.6, à environ 3 231 (IC 95 % : 147-18 065) le nombre de maisons dans la province ayant des concentrations en radon supérieures à 800 Bq/m³ au rez-de-chaussée. Des nombres approximatifs de 19 680 (IC 95 % : 3 966-35 249) maisons pourraient présenter des teneurs supérieures à 200 Bq/m³ au rez-de-chaussée et 35 984 (IC 95 % : 18 065-63 742), des concentrations supérieures à 150 Bq/m³.

Analyse et gestion du risque

Le groupe de travail de l'INSPQ a cherché à évaluer les conséquences pour la santé humaine de la présence de radon dans les domiciles au Québec et l'impact possible de différents scénarios d'intervention sur la mortalité par cancer du poumon.

Ainsi, à partir des données québécoises d'exposition au radon, de mobilité résidentielle et de tabagisme, le groupe de travail de l'INSPQ, par le biais d'une analyse de risque basée sur un modèle conçu par le comité BEIR VI, estime que l'exposition résidentielle au radon expliquerait environ

published in 2004 by this working group. It starts with the description of radon concentrations measured in residences in Quebec. Then it carries out a risk analysis based on one of the models designed by the BEIR VI Committee. According to this analysis, radon would explain approximately 10% of the deaths by lung cancer, that is approximately 430 of the 4 101 deaths associated each year to this type of cancer in Quebec. Thereafter, it glances at the various intervention strategies implemented throughout the world. It follows the analysis of intervention strategies which are possible for Quebec and the recommendations that the working group drew from this analysis, in particular two of them which were considered to be most promising: the adoption of preventive measures in the Quebec Code of Construction and radon screening in public buildings (schools, day care centres, etc). Lastly, it presents the work carried out at the federal level on the revision of the Canadian guideline which was fixed at 800 Bq/m³ since 1988. The Federal Radioprotection Bureau made a proposal to the Canadian Minister of Health to set the guideline down to 200 Bq/m³. This modification should be announced in the spring 2007.

10 % des décès par cancer du poumon, soit environ 430 des 4 101 décès attribuables chaque année à ce type de cancer sur la base des données du fichier des décès au Québec en 1998. Paradoxalement, la plupart de ces 430 décès surviendraient dans des situations d'expositions à des concentrations relativement faibles en radon (< 150 Bq/m³), phénomène s'expliquant par le fait que plus de 90 % des maisons au Québec présentent des concentrations en radon inférieures à cette valeur. Les fumeurs représentent un groupe particulièrement à risque de développer un cancer du poumon en lien avec une exposition au radon. On estime en effet qu'environ 60 % des décès par cancer du poumon associé au radon vont survenir chez des fumeurs alors que 30 % surviendront chez des ex-fumeurs et 10 % chez des non-fumeurs.

Stratégies d'intervention pour le Québec

Le groupe de travail de l'INSPQ a cherché à évaluer, par le biais d'une analyse de risque, les conséquences pour la santé humaine de la présence de radon dans les domiciles au Québec et l'impact possible de différents scénarios d'intervention sur la mortalité par cancer du poumon. Cette analyse de risque est basée sur un modèle conçu par le comité BEIR VI. Plusieurs scénarios ont été initialement étudiés par le groupe de travail : le statu quo, l'éducation sanitaire, la promotion du dépistage dans les zones à risque, le dépistage dans les zones à risque avec offre de support financier et technique pour la correction, le dépistage

¹ Le lecteur intéressé à obtenir de plus amples détails sur une section en particulier ou à prendre connaissance de l'ensemble des références bibliographiques est invité à consulter l'avis scientifique réalisé par le groupe de travail de l'INSPQ5, disponible sur le site Web suivant : www.inspq.qc.ca

obligatoire et universel dans les résidences, le dépistage obligatoire dans les édifices publics, le dépistage obligatoire dans les zones à risque et enfin, l'adoption de mesures préventives dans le Code de construction du Québec.

Les différents scénarios ont été notamment élaborés sur la base des données recueillies dans la littérature concernant les pourcentages réalistes de personnes effectuant le dépistage du radon et sa correction le cas échéant, dans le cadre de programmes de prévention. L'information disponible à cet effet démontre qu'il est généralement très difficile de persuader la population d'effectuer des tests de dépistage et que par conséquent, seule une minorité de propriétaires prennent des mesures dans leur maison, même dans les pays où ils ont été activement invités à le faire. En outre, en l'absence de programmes d'aide financière, peu de personnes cherchent à réduire les concentrations et ce, même si ces dernières sont élevées².

Bien que l'intervention (ou la correction) soit le principal moyen envisageable pour diminuer l'impact du radon sur la santé, il est également possible de prévenir les expositions élevées en agissant sur le bâtiment lors de sa construction. Cette approche, si elle ne concerne que la population habitant ces nouvelles constructions, a comme bénéfice de diminuer l'exposition de toute cette population, puisqu'elle permet d'abaisser même les faibles niveaux de radon. Comme la plupart des cancers associés au radon surviendraient chez des individus exposés à de faibles concentrations, cela permet d'avoir un impact plus important que la correction seule. Ainsi, l'incidence du cancer du poumon en lien avec le radon pourrait être diminuée dans la population habitant des bâtiments construits pour prévenir les infiltrations de radon. Après évaluation de l'efficacité des différentes options d'intervention pour réduire la mortalité annuelle attribuable au radon domiciliaire, et discussion sur les différentes stratégies envisageables, le groupe de travail a émis une série de recommandations.

Recommandations du groupe de travail

Dans son avis scientifique produit en décembre 2004, le groupe de travail de l'INSPQ a estimé que les risques à la santé associés au radon justifient des actions plus énergiques et un investissement de ressources supérieur à ce qui a été consenti dans le passé. Des activités d'information et de communication, dirigées vers la population et vers les différentes organisations susceptibles d'être associées à la démarche, ainsi que l'élaboration et la production d'un guide destiné à la prise en charge des demandes concernant des cas particuliers devraient être minimalement entreprises.

Le groupe de travail a recommandé que soient considérées par les autorités responsables les deux options de gestion de risque jugées les plus prometteuses, à brève échéance, par le groupe de travail, en termes d'efficacité et de faisabilité, soit l'adoption de mesures préventives dans le Code de construction du Québec et le dépistage du radon dans les bâtiments publics (établissements scolaires, garderies, etc.).

Le groupe n'était pas en mesure de recommander, dans l'état actuel des choses, la mise en place à court terme d'un programme destiné à promouvoir un dépistage à grande échelle dans l'ensemble des habitations, en raison des incertitudes et du succès limité de ces approches. Il recommandait donc une approche prudente permettant la mise en place graduelle des conditions nécessaires au succès des interventions et des programmes proposés. Cette approche présente comme avantage de permettre un investissement graduel, suivi d'une évaluation du succès possible des étapes subséquentes.

Compte tenu que la ligne directrice canadienne, dans sa formulation actuelle est mal interprétée et incite à l'inaction, le groupe de travail recommandait d'élaborer, sur une base populationnelle, des critères de gestion en fonction des stratégies rete-

nues au Québec et selon une approche fondée sur l'établissement d'une valeur en accord avec les recommandations internationales. Il recommandait aussi de faire des représentations auprès des autorités fédérales comme le Bureau de radioprotection de Santé Canada afin que les critères soient harmonisés. Les valeurs proposées par les autorités des pays qui se sont dotés d'une ligne directrice se situent entre 150 et 1 000 Bq/m³ selon les objectifs poursuivis, mais le plus souvent entre 200 et 400 Bq/m³. Le choix d'une stratégie laissant une large place à l'intervention de l'État, aux subventions et à la réglementation conduira à adopter un niveau d'intervention plus élevé que celui qui aurait été choisi si la stratégie était basée sur l'implication volontaire et autonome des propriétaires. Selon le groupe de travail, la valeur de référence devrait donc être établie en fonction de la stratégie d'intervention retenue et tenir compte de l'ensemble des composantes du programme.

Enfin, il apparaissait nécessaire, vu les risques individuels qui peuvent être rencontrés en présence d'une concentration élevée de radon domiciliaire, de rendre plus accessible l'information sur les risques liés au radon par l'éducation et l'information.

Regard sur les stratégies d'intervention à travers le monde

L'ampleur des programmes mis en place varie passablement d'un pays à l'autre. *L'International Commission on Radiological Protection* (ICRP) recommande l'utilisation de niveau d'action pour initier l'intervention et faciliter la prise de décision [7]. Dans la majorité des pays, les concentrations de référence définies pour les habitations n'ont pas force légale et correspondent plutôt à des valeurs guide. Pour les futures habitations, les valeurs de référence varient suivant les pays entre 150 Bq/m³ et 1 000 Bq/m³. Si on exclut ces valeurs extrêmes, elles se situent plutôt entre 200 et 400 Bq/m³.

Quelle que soit l'ampleur de la politique mise de l'avant, les autorités gouvernementales axent davantage leur intervention face au risque causé par le radon dans les domiciles sur l'information et le volontarisme que sur les actions à caractère réglementaire. Par contre, elles sont beaucoup plus portées à légiférer lorsqu'il s'agit d'édifices publics et de nouvelles habitations. La prévention dans le cas de nouvelles habitations est aussi un élément central de la très grande majorité des stratégies développées. En effet, plusieurs pays ont intégré à même les codes de construction des bâtiments des mesures visant à réduire l'exposition au radon dans les nouvelles maisons.

Le dépistage des zones à risque constitue partout une étape importante des programmes de gestion qui ont été développés. La disponibilité de techniques d'assainissement efficaces, durables et qui peuvent facilement être mises en place est un élément essentiel à l'élaboration d'un programme d'intervention sur le radon. Les méthodes de correction ne sont généralement pas imposées aux propriétaires. Les autorités publiques mettent plutôt à la disposition des propriétaires des guides et des manuels décrivant les différentes techniques de mesure et de correction ainsi que leur efficacité et leur coût. La démonstration de la faisabilité des différentes techniques d'atténuation est un élément important à considérer lors de l'élaboration d'une politique d'intervention sur le radon.

L'information du public est souvent jugée comme un maillon essentiel à la mise en place d'une politique sur la gestion des risques liés au radon. Il est clair que malgré les efforts importants déployés dans plusieurs pays, dans la très grande majorité des cas, le nombre de résidences dans lesquelles des mesures ont été prises pour réduire l'exposition au radon demeure, même après plusieurs années, relativement faible (entre 3 et 6 % seulement des propriétaires aux États-Unis avaient mesuré les concentrations de radon dans les maisons en 1992). Les raisons invoquées pour justifier la non-intervention sont les coûts élevés des mesures (50 % des répondants), l'incrédulité face au risque que présente le radon et la difficulté à obtenir de l'information appropriée sur les mesures à mettre en place.

² Le lecteur désirant prendre connaissance des résultats détaillés de l'analyse des scénarios étudiés par le groupe de travail de l'INSPQ est invité à consulter l'avis scientifique produit par ce dernier [5].

Une des recommandations du groupe de travail a mené à la création d'un comité de suivi sur la prévention des risques associés au radon dans les habitations, sous l'égide du ministère de la Santé et des Services sociaux (MSSS), qui regroupe en plus du MSSS, des représentants des directions de santé publique et de l'Institut national de santé publique du Québec.

Comité de suivi sur la prévention des risques associés au radon dans les habitations

L'objectif visé par la mise en place du comité de suivi est donc d'assurer l'application des recommandations prioritaires de l'avis scientifique produit par le groupe de travail de l'Institut national de santé publique du Québec et d'impliquer le public et les différents partenaires dans les consultations, lorsque nécessaire. Pour rejoindre ces objectifs, le comité de suivi mettra en place des groupes de travail dont la composition variera en fonction de la tâche à accomplir.

Parmi l'ensemble des recommandations formulées, le comité de suivi a déjà mis en route, au Québec, diverses activités de communication, et participe aux travaux sur la révision de la ligne directrice fédérale sur le niveau limite d'exposition au radon. Le comité a également proposé des modifications à la version québécoise du Code national du bâtiment concernant les mesures de protection contre les gaz souterrains. Il prépare également des outils d'information et prévoit de donner des activités de formation destinées au public, aux professionnels du milieu de l'habitation et de la construction-rénovation ainsi que des journées de formation au cours de l'hiver 2007-2008 aux équipes de santé environnementale des directions de santé publique. Un guide d'harmonisation des pratiques est actuellement en préparation pour aider les équipes régionales à répondre aux demandes des citoyens.

Travaux sur la ligne directrice canadienne

Depuis 1988, le Canada, avec sa valeur de référence de 800 Bq/m³, faisait cavalier seul avec une ligne directrice des plus permissives parmi les pays industrialisés. La directive canadienne est souvent considérée comme une valeur plancher au-dessous de laquelle il n'est pas nécessaire d'agir. Cette interprétation erronée peut avoir pour effet d'occasionner une certaine inertie dans la population face à la remédiation lorsque les teneurs sont inférieures à cette valeur. Face à cette situation et suite aux nouvelles connaissances concernant le radon, le Bureau de la radioprotection de Santé

Canada a mis sur pied en 2004 un sous-comité afin de réviser la ligne directrice canadienne.

Ce groupe de travail a fait rapport au Comité de radioprotection fédéral-provincial-territorial. Dans ce rapport, le groupe de travail recommande, entre autres, de prendre des mesures correctives lorsque la concentration annuelle moyenne de radon dans un immeuble dépassant 200 Bq/m³ dans une zone d'occupation normale. L'application de la ligne directrice inclut les immeubles à forte densité de population (p. ex. écoles, hôpitaux, centres de soins de longue durée et établissements correctionnels). Par ailleurs, plus la concentration de radon est élevée, plus vite il faudrait entreprendre des mesures correctives. À un niveau supérieur à 800 Bq/m³, ces mesures devraient être terminées à l'intérieur d'une année. De plus, lors de la prise de mesures correctives, il faudrait ramener le niveau de radon à une valeur aussi basse que possible de façon raisonnable. Enfin, lors de la construction de nouveaux immeubles, il faudrait utiliser des techniques qui permettent de minimiser l'infiltration du radon et de faciliter l'enlèvement du radon après la construction, si cela s'avérait nécessaire.

Le groupe de travail de l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) et le Ministère de la Santé et des Services sociaux du Québec (MSSS) se sont montrés très réceptifs à l'annonce de Santé Canada de proposer une révision de la ligne directrice canadienne sur le radon.

Afin de préciser les stratégies à privilégier, le Comité de radioprotection fédéral-provincial-territorial a décidé de former un groupe de travail, le *Radon Implementation Working Group* pour examiner les étapes nécessaires à la mise en œuvre d'une ligne directrice révisée sur le radon. Ce groupe de travail, qui a commencé ses travaux en février 2006, est mené par Santé Canada et comprend des membres issus du département de la Défense nationale et des provinces de la Nouvelle-Écosse, de l'Ontario, de la Colombie-Britannique, de la Saskatchewan et du Québec. Ce groupe de travail a remis un rapport d'étape sur les modalités d'implantation de la nouvelle ligne directrice en octobre 2006. Le Comité de radioprotection fédéral-provincial-territorial a entériné ses recommandations à condition que Santé Canada s'assure, notamment, de la rédaction de guides d'application de la ligne directrice, ainsi que de la mise en œuvre de programmes visant la certification des firmes d'analyse du radon et la formation des entrepreneurs en mesures de correction contre le radon. Des protocoles standardisés adaptés pour le Canada à partir de ceux qui existent aux États-Unis pour les mesures de radon

et pour les travaux de correction sont actuellement en production. Plusieurs projets pilotes de mesure de radon dans des écoles et/ou des édifices publics sont en cours, notamment au Québec ainsi qu'en Colombie Britannique, en Alberta, en Saskatchewan et en Nouvelle Écosse.

Conclusion

L'exposition au radon dans les résidences doit être considérée, pour la population générale, comme une cause de cancer du poumon qui peut être réduite. Par ailleurs, diverses stratégies d'intervention ont été analysées par l'INSPQ afin de réduire l'exposition de la population à l'échelle provinciale. Un comité de suivi sur la prévention des risques associés au radon dans les habitations a d'ailleurs été mis sur pied afin de donner suite aux scénarios jugés les plus prometteurs. Le Ministre de la santé du Canada a approuvé la proposition de la nouvelle ligne directrice et devrait en faire l'annonce au printemps 2007. On peut donc prévoir une augmentation des activités de santé publique concernant le radon au Canada parallèlement à ce qui se prépare au Québec. Les jalons sont posés pour établir dans notre province une intervention de santé publique dont les stratégies de gestion du risque devraient s'harmoniser avec le reste du Canada et la plupart des pays qui se sont dotés de ce type de programme.

Références

- [1] U.S. Department of Health and Human Services. 1994. Public Health Service, National Toxicology Program. Seventh Annual Report on Carcinogens.
- [2] IARC. 1988; 300 pages ISBN 92 832 1243 6. Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Volume 43: Man-made Mineral Fibres and Radon.
- [3] National Research Council (NRC), 1998. Health effects of exposure to radon. BEIR VI. National Academy Press, Washington.
- [4] Lubin JH, Boice JD Jr, Edling C, Hornung RW, Howe GR, Kunz E, Kusiak RA, Morrison HI, Radford EP, Samet JM, Tirmarche M, Woodward A, Yao SX, Pierce DA. 1995. Lung cancer in radon-exposed miners and estimation of risk from indoor exposure. Journal of the National Cancer Institute, 87:817-27.
- [5] Dessau JC, Gagnon F, Lévesque B, Prévost C, Leclerc J-M, Belles-Isles JC. 2005. Le radon au Québec - Évaluation du risque à la santé et analyse critique des stratégies d'intervention. INSPQ, 118 p. + annexes.
- [6] Lévesque B, Gauvin D, McGregor RG, Martel R, Gingras S, Dointigny A, Walker WB, Lajoie P. 1995. Étude d'exposition au radon222 dans les résidences de la province de Québec. 46 p. + annexes.
- [7] International Commission of Radiological Protection (ICRP). 1993. Protection Against Radon-222 at Home and at Work. Publication 65, Annals of the ICRP, 23(2).
- [8] Savard, M., Dessau, J.-C., Pellerin, E. 1998. Le Radon à Oka - Rapport d'intervention de santé publique. Direction régionale de la santé publique des Laurentides, 134p., ISBN 2-921581-83-3.

La publication d'un article dans le BEH n'empêche pas sa publication ailleurs. Les articles sont publiés sous la seule responsabilité de leur(s) auteur(s) et peuvent être reproduits sans copyright avec indication de la source.

Retrouvez ce numéro ainsi que les archives du Bulletin épidémiologique hebdomadaire sur <http://www.invs.sante.fr/BEH>

Directeur de la publication : Pr Gilles Brücker, directeur général de l'InVS

Rédactrice en chef : Florence Rossollin, InVS, redactionBEH@invs.sante.fr

Rédactrice en chef adjointe : Valérie Henry, InVS, redactionBEH@invs.sante.fr

Comité de rédaction : Dr Thierry Ancelle, Faculté de médecine Paris V ; Dr Denise Antona, InVS ;

Dr Claude Attali, médecin généraliste ; Dr Juliette Bloch, InVS ; Dr Isabelle Gremy, ORS Ile-de-France ;

Dr Rachel Haus-Cheymol, Service de santé des Armées ; Dr Yuriko Iwatsubo, InVS ;

Dr Christine Jestin, Inpes ; Dr Loïc Jossieran, InVS ; Eric Jouglé, Inserm CépiDc ;

Dr Bruno Morel, InVS ; Josiane Pillonel, InVS ; Dr Sandra Sinn-Tellier, InVS ; Hélène Therre, InVS.

N°CPP : 0206 B 02015 - N°INPI : 00 300 1836 -ISSN 0245-7466

Diffusion / abonnements : Institut de veille sanitaire - BEH rédaction

12, rue du Val d'Osne

94415 Saint-Maurice Cedex

Tél : 01 55 12 53 25/26

Fax : 01 55 12 53 35 - Mail : redactionbeh@invs.sante.fr

Tarifs 2007 : France et international 52 € TTC

Institut de veille sanitaire - Site Internet : www.invs.sante.fr