

EVALUATION DU RISQUE DE CANCER LIÉ À L'INHALATION DE RADON

Margot Tirmarche, Dominique Laurier, Hélène Baysson, Olivier Catelinois

IRSN/DPHD/SEGR/LEADS

Contexte

Le radon pénètre dans l'organisme avec l'air inhalé et plus rarement avec l'eau de boisson. Après inhalation, le radon, gaz de faible affinité avec les tissus biologiques, est ré-exhalé. Par contre, ses descendants particuliers, fixés ou non sur les aérosols atmosphériques, se déposent le long des voies respiratoires selon leur granulométrie. La plupart des descendants ont une action limitée aux tissus proches du site de dépôt, les cellules cibles étant les cellules de l'épithélium bronchique. Le risque de cancer à étudier de façon prioritaire est donc le risque de cancer du poumon. Or ce cancer peut être induit par des facteurs multiples, notamment le tabagisme. Les études épidémiologiques ont pour but d'établir la part du risque de ce cancer attribuable au radon domestique, part relativement faible comparativement à l'inhalation de la fumée de cigarette.

L'analyse du risque sanitaire lié au radon est complexe car l'exposition cumulée sur la durée de vie est la résultante d'une activité volumique variable et de la durée de séjour dans une atmosphère donnée. Une exposition pendant une longue durée à de faibles valeurs d'activité volumique apporte-t-elle le même risque qu'une exposition cumulée équivalente à une activité volumique plus élevée sur une durée d'exposition plus courte ? Cette question est au cœur du débat sur l'évaluation du risque aux faibles doses. Les résultats issus des études sur les mineurs d'uranium ont été souvent critiqués quant à leur utilisation pour déterminer l'ordre de grandeur du risque pour les expositions observées dans l'habitat. Les études menées durant les dix dernières années permettent de mieux cerner le risque pour des niveaux d'exposition dans l'habitat de l'ordre de 500 Bq.m^{-3} , que ce soit des résultats provenant du suivi de mineurs faiblement exposés ou d'études menées en population générale.

Parallèlement aux études épidémiologiques, plusieurs études expérimentales ont été menées en France dans le domaine des faibles expositions au radon. Les études animales confirment l'augmentation de risque de cancer du poumon pour des expositions inférieures à 100 unités d'exposition (WLM¹). Une synthèse est actuellement en cours dans le cadre d'un programme européen coordonné par le laboratoire d'épidémiologie de l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN). Elle décrira les différentes étapes de la cancérogenèse mises en jeu lors de cette exposition chronique au niveau de l'épithélium bronchique en regroupant l'ensemble des données provenant du suivi des mineurs d'uranium et des études expérimentales.

Différentes approches épidémiologiques possibles, mais leur capacité de réponse au problème posée est variable

1. Etudes géographiques descriptives

La démarche la plus simple et la plus intuitive est celle d'une comparaison des taux de cancer dans les régions à forte et à faible exposition au radon. Les données utilisables en France sont par exemple celles disponibles au niveau des départements : d'une part la moyenne des mesures d'activité volumique du radon, d'autre part le taux moyen de décès par cancer du poumon.

¹ Le WLM (Working Level Month) est une unité de mesure de l'activité volumique du radon propre au milieu professionnel minier. 1 WLM correspond à une exposition pendant 170 heures dans une atmosphère où la concentration en énergie α potentielle des descendants du radon est de 1 WL (1 WL est équivalent à $1,3 \cdot 10^5 \text{ MeV}$ par litre d'air).

1 WLM correspond à peu près à une exposition domestique pendant un an dans une atmosphère intérieure ou l'activité volumique du radon s'élève à 230 Bq.m^{-3} .

L'utilisation de ces valeurs est discutable car les personnes décédant dans une région, et donc à la base du calcul du taux annuel, n'ont pas forcément vécu très longtemps dans cette région. Or le cancer bronchique lié à une exposition donnée ne s'exprime qu'après un temps de latence important (de 10 à 20 ans). La principale critique relative à ces études est celle d'une mauvaise prise en compte de la contribution du tabac. Il a été observé qu'une consommation tabagique élevée multiplie le risque de cancer du poumon d'un facteur 5 à 10 alors que dans les régions où l'activité volumique du radon dans les habitations est supérieure à 200 ou 400 Bq.m³, le risque peut être multiplié par un facteur 1,2 à 1,5. De plus, l'âge au début du tabagisme est un facteur important qui ne peut pas être pris en compte dans une étude géographique. Un groupe d'experts de l'OMS a depuis longtemps préconisé de ne pas recourir à ce type d'étude dans le cas du radon domestique à cause des faiblesses inhérentes à ce type de démarche.

2. Etudes analytiques visant l'estimation du risque en tenant compte de l'exposition précise de chaque individu faisant partie de l'étude

Les études analytiques présentent l'avantage de consigner toutes les informations dosimétriques et sanitaires individuelles et de permettre une meilleure prise en compte des différents facteurs pouvant interagir avec le facteur radon. Le but de ces études est de vérifier une hypothèse formulée au moment de la conception de l'étude. Dans le cas présent, l'hypothèse est l'augmentation du risque de cancer du poumon en fonction de l'exposition cumulée au radon.

Deux types d'études sont possibles :

- les études de cohortes : elles sont surtout utilisées en milieu professionnel. Elles reposent sur un suivi de chaque individu faisant partie de la cohorte, depuis la date de sa première exposition jusqu'à la date de fin de suivi (date de décès, date de perdu de vue ou date de fin d'étude) ; son état sanitaire est enregistré systématiquement, parallèlement à son exposition annuelle. Onze cohortes de mineurs ont permis d'étudier le risque de cancer du poumon lié au radon [BEIR VI 1999].

- les études cas-témoins : elles comparent l'exposition cumulée dans un groupe de "malades" à celle d'un groupe de personnes exemptes de cette maladie. Si une relation existe entre une maladie donnée et une exposition, le niveau de cette exposition doit être plus élevé dans le groupe de personnes atteintes de cette maladie. Pour chaque personne, cas ou témoin, le recueil de l'information se fait de façon rétrospective, le plus souvent en lui demandant de répondre à un questionnaire ; l'évaluation de l'exposition est donc tributaire de la mémoire des individus interrogés. Ces études ont été mises en place, une fois connus les premiers résultats des études sur les mineurs, afin de vérifier sur le terrain si les résultats obtenus en milieu minier sont transposables à l'habitat et donc à la population générale. Elles visent la prise en compte de co-facteurs, comme le tabagisme actif ou passif, mal étudiés pour les cohortes de mineurs ou l'estimation directe du risque pour les populations féminines. Plusieurs de ces études ont été menées à l'échelle européenne, en respectant un même protocole : l'activité volumique du radon a été mesurée dans l'ensemble des maisons occupées durant les 30 années précédant le diagnostic d'un cancer du poumon.

Résultats observés

1. Etudes des mineurs

Dans l'étude sur les mineurs français publiée en 1993 [Tirmarche 1993], un excès de décès par cancer du poumon a été observé, ainsi qu'une augmentation significative de ce risque avec l'exposition cumulée au radon. L'étude comprenait 45 décès par cancer du poumon. Toutefois, il était impossible, sur la base d'un si faible effectif, de tester tous les facteurs pouvant modifier la relation exposition-

effet (tableau 1). La participation à une analyse conjointe de 11 cohortes de mineurs, coordonnée par le National Cancer Institute aux U.S.A. [Lubin 1994], a permis d'établir une estimation de risque plus précise. Cette analyse conjointe, fondée sur 2 620 décès par cancer du poumon, a confirmé l'existence d'une relation linéaire entre risque et exposition ; l'excès de risque relatif² obtenu est de 0,49 % par unité d'exposition (WLM) avec un intervalle de confiance à 95% se situant entre 0,2 % et 1 % (tableau 1). Cet excès de risque diminue en fonction de l'âge atteint et du temps écoulé depuis la fin de l'exposition. Ainsi, il apparaît que le risque associé à une exposition reçue il y a plus de 30 ans est quasiment nul.

Le suivi de la cohorte des mineurs d'uranium français continue. Une nouvelle analyse a été effectuée sur une cohorte élargie incluant plus de 5 000 mineurs, suivie jusqu'à fin 1994. Les résultats confirment l'augmentation du risque de cancer du poumon, pour une exposition moyenne de la cohorte égale à 37 WLM. L'excès de risque relatif estimé est de 0,8% par WLM. L'analyse de ces résultats est actuellement discutée dans le cadre d'un programme européen coordonné par le laboratoire d'épidémiologie de l'IRSN, vise à réaliser une analyse sur plus de 10 000 mineurs tchèques, français et allemands, ces mineurs ayant tous eu un suivi dosimétrique individuel de qualité. Dans le même programme sera également analysé l'ensemble des données d'expérimentations animales en rapport avec le radon. La synthèse de ces résultats permettra de discuter le modèle de cancérogenèse sous-jacent et de réunir un maximum d'informations sur les effets associés à de faibles expositions chroniques.

Tableau 1 : Radon et cancer du poumon dans 11 cohortes de mineurs d'après [Lubin 1997]

Localisation	Type de mine	Effectif	Suivi moyen (années)	Personnes -années	Exposition moyenne (WLM)	Décès par cancer du poumon	Excès de Risque Relatif moyen (% / WLM)
Chine	Etain	13 649	10	135 357	277	936	0,16 [0,1 – 0,2]
Tchécoslovaquie	Uranium	4 284	25	103 652	199	656	0,34 [0,2 – 0,6]
Colorado	Uranium	3 347	25	75 032	807	327	0,42 [0,3 – 0,7]
Ontario	Uranium	21 346	18	319 701	31	282	0,89 [0,5 – 1,5]
Terre Neuve	Fluorine	1 751	23	35 029	367	112	0,76 [0,4 – 1,3]
Suède	Fer	1 294	26	32 452	81	79	0,95 [0,1 – 4,1]
Nouveau Mexique	Uranium	3 457	17	46 797	110	68	1,72 [0,6 – 6,7]
Beaverlodge (CA)	Uranium	6 895	14	68 040	17	56	2,21 [0,9 – 5,6]
Port Radium (CA)	Uranium	1 420	25	31 454	243	39	0,19 [0,1 – 0,6]
Radium Hill (AU)	Uranium	1 457	22	25 549	8	32	5,06 [1,0 - 12,2]
France	Uranium	1 769	25	39 487	69	45	0,36 [0,0 – 1,3]
Total		60 570	17	908 983	162	2 620	0,49 [0,2 – 1,0]*

* Intervalle de confiance de 95%

² Excès de risque relatif = part de risque ajoutée par rapport à celui de même nature encouru par un individu non exposé ; un excès de risque relatif de 100% signifie que le risque est doublé.

2. Etudes du risque de cancer du poumon dans la population générale après inhalation de radon dans les habitations

Pour quantifier le risque de cancer du poumon dans la population générale, la réalisation d'études épidémiologiques sur le terrain est nécessaire. Un effort de collaboration internationale, soutenu par l'Union Européenne, a permis la mise en place de vastes études cas-témoins réunissant plusieurs milliers de cas et de témoins, afin d'obtenir une puissance statistique suffisante pour une estimation précise du risque. Une étude française a été réalisée dans ce cadre de collaboration, parallèlement à des études menées en Allemagne, Belgique, Luxembourg, Grande-Bretagne. L'analyse de l'étude française porte sur environ 600 cas (malades atteints d'un cancer du poumon) et 1200 témoins. A l'échelle européenne, l'analyse conjointe regroupe plusieurs milliers de cas appariés avec leurs témoins. Les résultats de ces analyses sont actuellement soumis à publication dans un journal international. L'étude française confirme que la relation exposition-risque peut être représentée par une droite dont la pente est positive, proche de celle « prédite » à partir des données des études sur les mineurs français.

Synthèse des études publiées

Le bilan qui suit est fondé sur des études publiées récemment en Europe, ainsi que sur les principales études réalisées au Canada et aux USA. Le tableau 2 résume ces études ainsi que leurs résultats. Il montre que, pour un sujet environnemental comme le radon domestique, un effort épidémiologique remarquable a été fait au niveau international.

Plusieurs études ont le mérite d'avoir étudié le risque chez les femmes, et certaines l'ont étudié chez les non-fumeurs. Globalement la grande majorité de ces études conclut à un risque relatif supérieur à 1 pour une augmentation d'exposition de 100 Bq.m³; les études suédoises [Pershagen 1994], une étude américaine [Alavanja 1999] et une étude chinoise [Wang 2002] montrent une augmentation statistiquement significative du risque de cancer du poumon en fonction de l'exposition domestique au radon (tableau 2). Toutes ces études ont étudié le risque de cancer du poumon en mesurant les concentrations du radon dans l'habitat sur 15 voire 30 ans. Dans certaines régions, notamment en Europe, cette durée nécessite la mesure du radon dans 2 maisons en moyenne ; au Canada, du fait de changements de résidence plus fréquents, une période de 30 ans conduit à mesurer le radon dans au moins 5 maisons. Or, les maisons ne sont pas forcément faciles à retrouver et des travaux ont pu être entrepris depuis, d'où des imprécisions qui peuvent altérer la capacité de mettre en évidence un risque [Letourneau 1994]. L'étude menée en Allemagne de l'Ouest [Kreienbrock 2001], bien que très vaste, montre une absence d'augmentation du risque sauf si l'on considère des zones géographiques à forte émanation de radon (tableau 2) ; cette étude inclut un nombre très important de maisons à faible exposition et n'avait probablement pas la capacité de mettre en évidence un risque lié au radon.

La quasi-totalité de ces études repose sur une très bonne information du comportement tabagique des personnes concernées, et celles sur les non-fumeurs incluent des informations sur le tabagisme passif. L'excès de risque relatif indiqué dans le tableau ci-après est à interpréter comme une augmentation liée au radon après standardisation sur le comportement tabagique.

Une méta-analyse³ des résultats de 8 études publiées entre 1990 et 1996 a été effectuée [Lubin 1997]. Elle porte sur un total de cas de 4 263 cancers du poumon et de 6 612 témoins et montre une augmentation des risques relatifs avec le niveau d'exposition. Pour une exposition à 150 Bq.m³ pendant 25 ans, le risque relatif est estimé à 1,14 (Intervalle de Confiance 95%=[1,01 - 1,30]). Cette estimation est très proche de celle obtenue par l'étude relative aux mineurs faiblement exposés [Lubin 1997]. Mais il faut noter une grande variabilité des estimations de risque d'une étude à l'autre. De plus, l'estimation est fortement tributaire d'une seule étude, celle de Pershagen et al. [Pershagen 1994].

³ Dans une analyse conjointe, toutes les données initiales sont analysées ensemble ; dans une méta-analyse, seul les résultats sont considérés simultanément

Tableau 2 : Radon et cancer du poumon : bilan des études cas-témoins publiées

Auteur	Année	Pays	Population	Effectifs	Mesure de l'exposition	Risque Relatif ^(a)	Intervalle de confiance à 95%
Schoenberg	1990	USA (New Jersey)	femmes	480 cas, 442 témoins	1 an	1,49	0,89-1,89
Blot	1990	Chine	femmes	308 cas, 356 témoins	1 an	0,95	Non défini-1,08
Pershagen	1992	Suède	femmes	201 cas, 378 témoins	1 an	1,16	0,89-1,92
Pershaen Lagarde	1994 1997	Suède	-	1281 cas, 2576 témoins	3 mois	1,10 1,17 ^(b)	1,01-1,22 1,03-1,37
Letourneau	1994	Canada	-	738 cas, 738 témoins	1 an	0,98	0,87-1,27
Alavanja	1994	USA (Missouri)	femmes, non fumeuses	538 cas, 1183 témoins	1 an	1,08	0,95-1,24
Auvinen	1996	Finlande		517 cas, 517 témoins	1 an	1,11	0,94-1,31
Ruosteenoia	1996	Finlande	hommes	164 cas, 331 témoins	2 mois	1,80	0,90-3,50
Darby	1998	Grande Bretagne	-	982 cas, 3185 témoins	6 mois	1,08 1,12 ^(c)	0,97-1,20 0,95-1,33
Alavanja	1999	USA (Missouri)	femmes	247 cas, 299 témoins 372 cas, 471 témoins	1 an	0,85 ^(d) 1,63 ^(e)	0,73-1,00 1,07-2,93
Field	2000	USA (Iowa)	femmes	413 cas, 614 témoins	1 an	1,24	0,95-1,92
Wichmann	2000	Allemagne (Est)		1053 cas, 1667 témoins	1 an	1,04	0,96-1,12
Kreienbrock	2001	Allemagne (Ouest)	-	1449 cas, 2297 témoins	1 an	0,97 ^(f) 1,09 ^(g)	0,82-1,14 0,86-1,38
Pisa	2001	Italie	-	138 cas, 291 témoins	1 an	1,40	0,3-6,6
Lagarde	2001	Suède	non-fumeurs	436 cas, 1649 témoins	3 mois	1,10	0,96-1,38
Wang	2002	Chine	-	768 cas, 1659 témoins	1 an	1,19	1,05-1,47
Barros-Dios	2002	Espagne	-	159 cas, 237 témoins	90 jours min	-	-
Lagarde	2002	Suède		110 cas, 231 témoins	3 mois	1,33 ^(d) 1,75 ^(e)	0,88-3,0 0,96-5,30

(a) pour une exposition à 100 Bq/m³
(b) après prise en compte des erreurs de mesure
(c) après prise en compte des erreurs de mesure
(d) analyse fondée sur des dosimètres traditionnels
(e) analyse fondée sur des mesures sur des objets en verre
(f) ensemble de la région d'étude, période 5-15 années avant inclusion dans l'étude
(g) régions à fort potentiel d'exhalation de radon, période 5-15 années avant inclusion dans l'étude

A l'échelle européenne, une analyse conjointe portant sur près de 10 000 cas de cancer du poumon et un nombre équivalent de témoins est actuellement en cours de réalisation, sous la direction de l'université d'Oxford. Elle apporte une plus grande puissance statistique à l'estimation de la pente de la relation dose-effet. Cette analyse conjointe étudiera également les interactions entre radon et tabac : en effet, les résultats relatifs aux mineurs sont plutôt en faveur d'une action synergique, multiplicative des deux cancérigènes ; en d'autres termes, le fait d'inhaler la fumée de tabac et les descendants du radon produirait des effets plus qu'additifs.

3. Risques autres que le cancer du poumon

Les études sur les mineurs d'uranium n'ont pas montré d'augmentation de risque en fonction de l'exposition cumulée au radon pour des cancers autres que le cancer du poumon [Darby 1995]. Depuis les années 1990, plusieurs auteurs ont estimé qu'une partie de l'irradiation due à l'inhalation de radon peut être délivrée au niveau de la moelle osseuse hématopoïétique. L'hypothèse a été émise que cette irradiation pourrait entraîner un risque accru de leucémie chez l'homme. Une telle association est supportée par les résultats de certaines études écologiques. Néanmoins, les études de cohortes sur les mineurs d'uranium ou les études cas-témoins qui ont été réalisées n'ont pas confirmé l'existence d'une relation entre l'exposition au radon et le risque de leucémie. Une revue critique de la littérature scientifique a été effectuée récemment par l'IRSN [Laurier 2001]. Elle conclut que l'ensemble des

résultats épidémiologiques actuellement disponibles ne fournit pas de support à l'hypothèse d'une relation causale entre le risque de leucémie et l'exposition au radon.

Évaluation du risque de cancer du poumon

L'utilisation de la relation dose-effet observée chez les mineurs pour quantifier le risque de cancer du poumon, attribuable à une exposition domestique, nécessite certes des ajustements. Toutefois les résultats des études récentes donnent plus de crédit à cette estimation de risque : les observations sur le terrain vont dans le même sens que les résultats issus des études en milieu professionnel. Les ajustements font appel à trois types d'inférence statistique décrite dans la figure 1 :

- l'extrapolation, qui consiste à considérer que le coefficient de risque ajusté au niveau de dose de 70 WLM (celui des mineurs) reste valable au niveau de dose rencontré dans l'habitat (l'exposition cumulée durant 20 ans à 230 Bq.m^{-3} correspond à 20 WLM) ;
- la transposition, qui consiste à appliquer la relation dose-effet obtenue dans une population professionnelle (constituée d'hommes) à une population générale (incluant des femmes et des enfants) ;
- l'analogie, qui consiste à supposer que les mélanges de radon et des descendants retrouvés dans l'habitat possèdent le même potentiel cancérigène que le mélange gazeux présent dans les mines d'uranium.

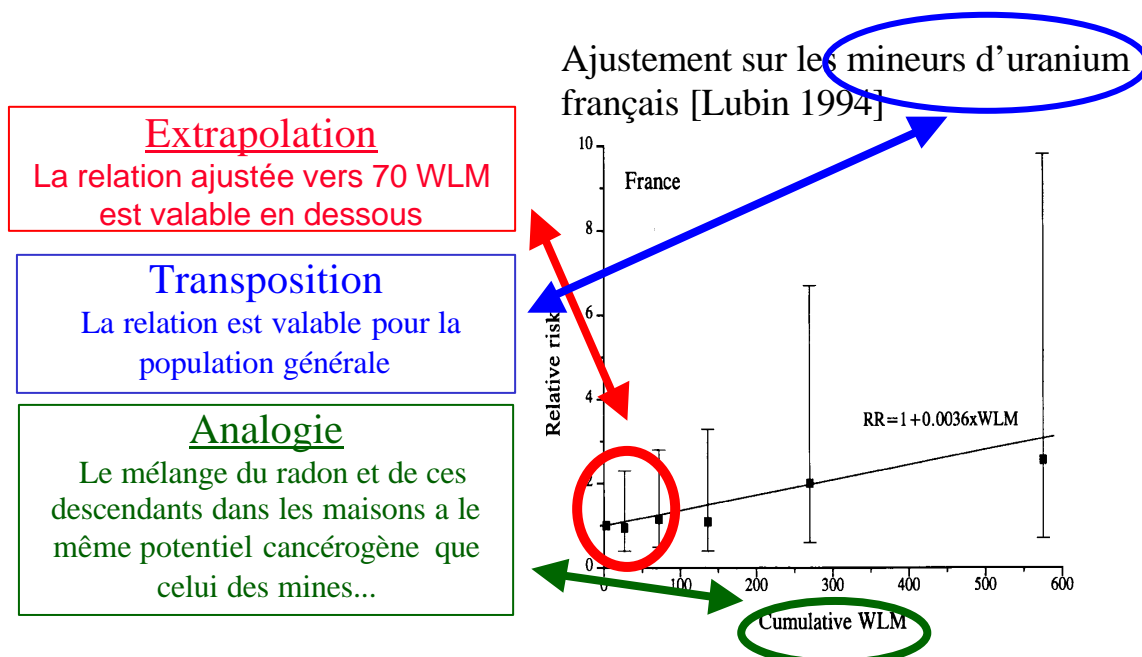


Figure 1 : Estimation du risque associé à l'exposition au radon domestique à partir des études sur les mineurs.

Cette approche a été utilisée par les comités d'experts, notamment l'académie des sciences américaine, pour calculer le nombre de cancers attribuables au radon domestique [BEIR VI 1999]. L'estimation du risque aux faibles expositions à partir des données relatives aux mineurs suppose l'utilisation de modèles et la prise en compte des interactions entre radon et tabac notamment.

La quantification du risque pour une exposition pendant l'enfance est difficile à réaliser car peu de données sont disponibles. Une seule étude sur les mineurs d'étain en Chine [Xuan 1993] a pu inclure un nombre non négligeable de jeunes exposés avant l'âge de 15 ans. Les auteurs concluent que

l'exposition pendant l'enfance ne semble pas entraîner un risque de cancer du poumon plus élevé que celui observé pour un même niveau d'exposition à l'âge adulte.

Certaines études avaient suggéré que le risque associé à une exposition donnée était plus élevé quand celle-ci était étalée sur une longue période, ou quand le débit d'exposition était faible. Ce phénomène a été dénommé "effet de débit de dose inverse". Mais, les résultats récents obtenus pour les mineurs français, pour lesquels l'exposition annuelle est faible et étalée sur une longue période (12 ans), ne confirment pas cet effet. De plus, une étude internationale publiée en 1997 [Lubin 1997] et restreinte aux expositions cumulées inférieures à 100 WLM ne fait plus apparaître d'effet de débit de dose inverse, quand on se limite aux mineurs ayant des expositions étalées sur des périodes relativement longues. Les études récentes sur des groupes d'animaux faiblement exposés confirment également ces résultats [Monchaux 2002].

Le risque pour les non-fumeurs est plus difficile à préciser, car, dans les cohortes de mineurs, le nombre de non-fumeurs est faible et dans les études cas-témoins, il correspond à 5 à 10 % des cas de cancer du poumon étudiés.

Plus on s'éloigne des conditions de l'exposition des mineurs (concentrations ou expositions cumulées dans le temps, sexe, âge, habitudes tabagiques), plus la prédiction est incertaine. Pour les populations faiblement exposées, le risque est estimé en retenant l'hypothèse qu'il est proportionnel à l'exposition.

Pour les habitants de logements où l'activité volumique du radon se situe au dessus de $1\,000\text{ Bq.m}^{-3}$, l'exposition sur une vie entière dépasse l'exposition cumulée de la majorité des mineurs français durant leur vie professionnelle. Entre $1\,000$ et 400 Bq.m^{-3} , l'exposition cumulée par les habitants est voisine de celle de ces mineurs. Entre 400 et 150 Bq.m^{-3} , la « distance » avec l'exposition des mineurs est plus grande, mais certaines études de terrain soulèvent la question de l'existence d'un risque à ces niveaux d'exposition. En dessous de 150 Bq.m^{-3} , aucun excès de risque n'a pu être mis en évidence.

L'excès de risque relatif de décès par cancer du poumon est ainsi estimé à 0,25% par an, pour 100 Bq.m^{-3} d'exposition au radon domestique (estimation tirée de l'étude sur les mineurs français, confirmée par les études internationales⁴).

Calculé sur une durée de vie de 70 ans, le risque serait de l'ordre de :

- 35% pour l'occupant d'un habitat où l'activité volumique du radon est 200 Bq.m^{-3} (risque multiplié par 1,35) ;
- 70% pour l'occupant d'un habitat où l'activité volumique du radon est 400 Bq.m^{-3} (risque multiplié par 1,7) ;
- 175% pour l'occupant d'un habitat où l'activité volumique du radon est $1\,000\text{ Bq.m}^{-3}$ (risque multiplié par 2,75).

Ces estimations sont valables pour un temps d'exposition de 7 000 heures par an dans l'habitation, et l'excès de risque est comparé à celui d'une population fictive qui serait exposée à 0 Bq.m^{-3} . Il s'agit d'un ordre de grandeur car ces estimations ne tiennent pas compte du temps écoulé depuis l'exposition qui joue probablement un rôle réducteur du risque [BEIR VI 1999 ; Rogel 2002].

Les évaluations de risque ont été réalisées pour différentes populations générales, en particulier en Grande-Bretagne, aux Etats-Unis et en France. Ces études permettent de fournir une fourchette du risque attribuable à l'exposition domestique au radon comprise entre 6,5 % et 19 % [Darby 2001 ; BEIR VI 1999 ; Pirard 2001]. Cette fourchette d'estimation du risque attribuable est en partie tributaire des variations d'exposition suivant les pays considérés et des consommations tabagiques retenues dans ces évaluations.

Lorsque le tabagisme est associé au radon, les effets feraient plus que s'additionner et la probabilité de développer un cancer du poumon augmente notablement. Or l'excès de risque relatif de cancer du poumon est déjà au minimum de 900% pour un fumeur d'un paquet de cigarettes par jour. Par comparaison, celui encouru par une personne vivant dans une maison où les concentrations de radon

⁴ Dans un souci de simplification, l'excès de risque relatif dû à l'exposition moyenne de la population n'est pas pris en compte.

se situent entre 200 et 400 Bq.m³ est proche de celui d'une personne vivant dans une atmosphère de tabagisme passif.

Références

- Alavanja MC, Lubin JH, Mahaffey JA, Brownson RC. Residential radon exposure and risk of lung cancer in Missouri. *Am J Public Health* 1999; 89(7): 1042-1048.
- BEIR VI, National Research Council. Committee on Health Risks of Exposure to Radon. Board on Radiation Effects Research. Health effects of exposure to radon. Washington, D.C.: National Academy Press; BEIR VI report; 1999.
- 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): 378-384.
- Darby S, Hill D, Doll R. Radon : a likely carcinogen at all exposures. *Annals of oncology* 2001; 12: 1341-1351, 2001.
- Kreienbrock L, Kreuzer M, Gerken M, Dingerkus G, Wellmann J, Keller G, et al. Case-control study on lung cancer and residential radon in western Germany. *Am J Epidemiol* 2001; 153(1): 42-52.
- Laurier D, Valenty M, Tirmarche M. Radon exposure and the risk of leukemia: a review of epidemiological studies. *Health Phys* 2001; 81(3): 272-288.
- Letourneau EG, Krewski D, Choi NW, Goddard MJ, McGregor RG, Zielinski JM, et al. Case-control study of residential radon and lung cancer in Winnipeg, Manitoba, Canada. *Am J Epidemiol* 1994; 140(4): 310-322.
- Lubin J, Boice JD, Edling JC, Hornung RW, Howe GR, Kunz E, et al. Radon and lung cancer risk: a joint analysis of 11 underground miner studies: National Institutes of Health (NCI) 1994.
- Lubin JH, Boice JD Jr. Lung cancer risk from residential radon: meta-analysis of eight epidemiologic studies. *J Nat Cancer Inst* 1997; 89: 49-57.
- Lubin JH, Tomasek 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* 1997; 147(2): 126-134.

- Monchaux G, Morlier J.P. Influence of exposure rate on radon-induced lung cancer in rats. *J Radiol Prot* 2002; 22: 81-87.
- Pershagen G, Akerblom G, Axelson O, Clavensjo B, Damber L, Desai G, et al. Residential radon exposure and lung cancer in Sweden. *N Engl J Med* 1994; 330 (3): 159-164.
- Pirard Ph, Hubert Ph. Le radon en Bretagne : évaluation de l'exposition et du risque associé. Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire Note technique DPHD/SEGR/00-79 – indice 1. Mai 2001.
- Rogel A, Laurier D, Tirmarche M, Quesne B. Lung cancer risk in the French cohort of uranium miners. *J Radiol Prot* 2002;22:101-106.
- 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 (5): 1090-1097.
- Wang Z, Lubin JH, Wang L, Zhang S, Boice JD Jr, Cui H, et al. Residential radon and lung cancer risk in a high-exposure area of Gansu Province, China. *Am J Epidemiol* 2002; 155: 554-564.
- Xuan X.Z., Lubin J.H., Li J.H., Yang L.F., Luo A.S., Lan Y., et al. A Cohort Study in Southern China of Tin Miners Exposed to Radon and Radon Decay Products. *Health Phys.* 1993; 64 (2): 120-131.