Déterminants des concentrations intérieures en radon dans les logements français

Exploitation des données collectées dans plus de 6 000 maisons

ELINE LE PONNER¹
BERNARD COLLIGNAN²
BÉRENGÈRE LEDUNOIS³
CORINNE MANDIN¹

¹ Université Paris-Est /
Centre scientifique et
technique du bâtiment
(CSTB)

84, avenue Jean Jaurès
77447 Champs-sur-Marne
Cedex 02
France
<elinelepo@gmail.com>
<corinne.mandin@cstb.fr>

² Centre scientifique et
technique du bâtiment
(CSTB)

24, rue Joseph Fourier
38400 Saint-Martin-d'Hères
France
<bernard.collignan@
cstb.fr>

³ Ministère des solidarités
et de la santé

14, avenue Duquesne
75350 Paris
France
<berengere.ledunois@
sante.gouv.fr>

Tirés à part :
C. Mandin

Résumé. Le radon est un gaz radioactif d'origine naturelle, classé cancérigène pulmonaire certain, qui cause environ 2 000 décès par an en France. Afin de sensibiliser la population à ce risque, trois campagnes de mesure des concentrations intérieures en radon ont été conduites dans 6 010 maisons situées en Bretagne et en Limousin (région Nouvelle-Aquitaine) entre 2011 et 2016. Un kit contenant un dosimètre, un manuel d'utilisation ainsi qu'un questionnaire sur certaines caractéristiques du logement, a été distribué à chaque ménage. Le dosimètre devait être exposé pendant une période de deux mois en hiver, au niveau le plus bas de la maison occupé au moins une heure par jour. La médiane de la concentration en radon dans les 6 010 maisons était de 167 Bq.m⁻³ avec un 5^e percentile égal à 36 Bq.m⁻³ et un 95^e percentile à 1 161 Bq.m⁻³. Une régression linéaire hiérarchique a été mise en œuvre pour rechercher les déterminants des concentrations intérieures en radon. Les résultats montrent l'influence de huit variables sur les concentrations intérieures en radon : le potentiel d'exhalation en radon du sol, le type de soubassement de la maison, le matériau de construction, la période de construction, le nombre de niveaux habités, la localisation du dosimètre, un changement de fenêtres et le type de ventilation. Le potentiel du sol est la variable ayant la plus forte influence. Cette étude conforte des déterminants du radon déjà connus et met en évidence d'autres variables moins étudiées, comme le type de ventilation, ou non identifiées à ce jour comme pouvant influencer la concentration en radon, comme le changement de fenêtres.

Mots clés : radon ; logement ; qualité de l'air intérieur ; radioactivité ; modèle hiérarchique.

Abstract

Determinants of indoor radon concentrations in French dwellings Analysis of measurements in more than 6,000 houses

Radon is a radioactive natural gas that is a human carcinogen, causing around 2,000 deaths yearly in France. To raise people's awareness of this risk, three surveys monitored indoor radon concentrations in 6,010 houses in Brittany and Limousin, France, between 2011 and 2016. A kit was distributed to each household, including a passive dosimeter, a user manual, and a questionnaire about certain characteristics of the dwelling. The dosimeter was exposed for two months in winter, at the lowest level of the house occupied at least one hour per day. The median radon concentration in the 6,010 houses was 167 Bq.m⁻³ the 5th percentile was 36 Bq.m⁻³ and the 95th percentile 1,161 Bq.m⁻³. A hierarchical linear regression was used to study the determinants of indoor radon concentrations. The results show that they are influenced by eight variables: soil radon potential, type of foundation, main construction material, construction period, number of occupied levels, dosimeter

Article reçu le 18 février 2018,
accepté le 21 août 2018

doi: 10.1684/ers.2018.1265

Pour citer cet article : Le Ponner E, Collignan B, Ledunois B, Mandin C. Déterminants des concentrations intérieures en radon dans les logements français. Exploitation des données collectées dans plus de 6 000 maisons. *Environ Risque Sante* 2019 ; 18 : 33-40. doi : 10.1684/ers.2018.1265

location, window replacement, and type of ventilation. The soil radon potential is the variable with the strongest influence. This study confirms already well-known radon determinants but also reveals other less studied variables (i.e. the type of ventilation) and previously unknown variables that may influence the indoor radon concentration (i.e. window replacement).

Key words: radon; housing; indoor air quality; radioactivity; hierarchical modeling.

Le radon est un gaz radioactif d'origine naturelle qui représente en France le tiers de l'exposition moyenne de la population aux rayonnements ionisants [1]. En 1987, il a été reconnu cancérigène pulmonaire certain pour l'homme par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) [2]. En France, entre 5 et 12 % des décès par cancer du poumon seraient attribuables chaque année à l'exposition domestique au radon [3]. Le coût social de la pollution de l'air intérieur par le radon a été évalué à 2,7 milliards d'euros pour l'année 2004 en France [4]. Bien que peu connu du grand public, le radon constitue un véritable enjeu de santé publique. Dans ce contexte, la stratégie nationale de gestion de ce risque repose sur un corpus réglementaire et la conduite d'actions prioritaires, notamment *via* le déploiement d'actions de sensibilisation du public à ce risque. Parmi ces dernières, des campagnes de mesure des concentrations intérieures en radon par les particuliers ont été déployées en Bretagne et Nouvelle-Aquitaine au cours des dernières années, pendant les périodes de chauffe. En complément des mesures, les participants étaient invités à documenter certaines caractéristiques constructives du bâtiment, comme la date de construction, le type de ventilation, la réalisation de travaux pour améliorer l'efficacité énergétique du logement, etc. Ces données descriptives mises en regard des concentrations intérieures mesurées permettent la recherche des déterminants de ces concentrations et l'identification de leur contribution respective. De précédents travaux français [5-7] et internationaux [8-11] ont déjà permis la recherche des déterminants du radon, mais les données disponibles *via* ces campagnes de sensibilisation fournissent une opportunité unique d'approfondir la compréhension des concentrations intérieures en radon grâce au grand nombre de mesures réalisées (plus de 6 000).

Matériels et méthodes

Données disponibles

Trois campagnes de mesure du radon dans l'habitat ont été réalisées en Bretagne et en Limousin (région Nouvelle-Aquitaine). La première campagne de mesure a eu lieu sur les communes de Concarneau Cornouaille Agglomération (CCA), pendant les périodes de chauffe entre l'automne 2011 et le printemps 2014. Elle a été

organisée par l'association locale Consommation, logement et cadre de vie (CLCV) en collaboration avec l'Agence régionale de santé (ARS) de Bretagne et les soutiens du ministère chargé de la Santé et de l'Institut national du cancer (INCa). La deuxième campagne de mesure s'est déroulée sur l'ensemble de la Bretagne entre l'hiver 2014 et le printemps 2016. Elle a été organisée par l'ARS Bretagne - délégation départementale du Finistère. La troisième campagne s'est passée dans le Limousin entre l'automne 2014 et le printemps 2015. Elle a été organisée par l'ARS Limousin et les centres permanents d'initiatives pour l'environnement de Corrèze et de Creuse avec le soutien du ministère chargé de la Santé.

Pour ces trois campagnes, le protocole d'enquête (recrutement, méthode de mesure du radon, questionnaire d'accompagnement) était identique. Les logements étaient recrutés sur la base du volontariat en utilisant différentes méthodes de communication : sur les marchés ou *via* les pharmacies, par exemple. Un kit contenant un dosimètre, son manuel d'utilisation et un questionnaire descriptif des caractéristiques du logement était distribué aux participants.

Les mesures ont été réalisées avec les dosimètres EasyRad commercialisés par Pe@rl, Limoges, France, selon la norme NF ISO 11665-8 [12], en utilisant cependant un seul dosimètre (deux sont recommandés dans la norme). Chaque participant avait pour consigne de placer le dosimètre, pendant deux mois en période de chauffe (entre octobre et avril), au niveau du logement le plus bas occupé au moins une heure par jour. Selon la norme NF ISO 11665-8 [12], cette mesure permet une évaluation fiable de la concentration intérieure moyenne annuelle en radon. Les analyses ont été réalisées par Pe@rl selon la norme NF ISO 11665-4 [13].

Le questionnaire complété par les occupants décrivait les caractéristiques des bâtiments, à savoir : la période de construction, le type de soubassement, le système de ventilation, le nombre de niveaux habités, le lieu de pose du dosimètre, la réalisation d'une extension, la présence de murs enterrés ou semi-enterrés, le type de vitrage, le type de logement (maison ou appartement), le matériau de construction principal, la réalisation de travaux d'isolation, d'un changement de fenêtres et de travaux de ventilation. Concernant les occupants, seul le statut d'occupation (locataire ou propriétaire) était documenté. Par ailleurs, une variable « potentiel du sol » a été créée à partir de la carte du potentiel radon des formations géologiques du territoire français établie par l'Institut de

radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) [14]. Cette variable comprend trois modalités :

- catégorie 1, la commune est localisée sur une formation géologique avec de faibles teneurs en uranium ;
- catégorie 2, la commune est localisée sur une formation géologique avec de faibles teneurs en uranium, mais où des facteurs géologiques particuliers peuvent faciliter le transfert du radon vers les bâtiments ;
- catégorie 3, au moins une partie de la superficie de la commune présente des formations géologiques dont les teneurs en uranium sont estimées plus élevées que dans les autres formations.

Les appartements et les maisons nécessitant des analyses statistiques distinctes et les données étant principalement disponibles pour les maisons (6 010 maisons *versus* 226 appartements), seules ces dernières ont été retenues pour la recherche des déterminants. La base de données se compose ainsi de 6 010 maisons, dont 3 233 en CCA, 1 708 en Bretagne hors CCA et 1 069 en Limousin. Le jeu de données complet (mesure disponible et questionnaire complété à plus de 50 %) se compose de 4 102 maisons.

Méthodes statistiques

Des analyses descriptives ont tout d'abord été réalisées. Les paramètres de distribution – moyenne et écart-type arithmétiques, médiane, 5^e et 95^e percentiles – ont été calculés pour les variables quantitatives. Des tableaux de fréquence ont été établis pour les variables qualitatives. Pour mettre en évidence les interactions entre les variables, des analyses bivariées ont été réalisées. Lorsque les deux variables sont qualitatives, un test du Chi-2 ou un test exact de Fisher a été mené. Le second a été préféré au premier dès lors que l'hypothèse d'application n'était pas respectée, à savoir un effectif théorique de chaque classe supérieur ou égal à 5. Lorsque les deux variables sont quantitatives, un test de corrélation des rangs de Spearman a été appliqué car les distributions des paramètres étudiés ne suivent pas une loi normale. Lorsqu'une variable est qualitative et la seconde quantitative, un test non paramétrique de Kruskal Wallis a été utilisé si la variable qualitative possède plus de deux modalités. Si la variable qualitative possède deux modalités, le test équivalent de Mann-Whitney a été utilisé. Pour les variables quantitatives avec plus de deux modalités, des tests de Dunn ont ensuite été réalisés afin d'effectuer des comparaisons multiples. Un coefficient de corrélation intra-classe (CCI) a été calculé afin de savoir si la variabilité des concentrations a lieu majoritairement entre les maisons ou entre les campagnes de mesure.

La recherche des déterminants des concentrations en radon a été effectuée par une régression linéaire hiérarchique à deux niveaux. Cette méthode a été choisie car le jeu de données présente une structure

hiérarchique (observation-campagne de mesure) qui transgresse l'hypothèse d'indépendance des observations des modèles linéaires classiques. Le premier niveau représente les maisons et le second niveau les campagnes de mesure. Les caractéristiques des maisons ont été considérées comme des effets fixes. Il n'y a que la constante qui a été considérée comme effet aléatoire. Les concentrations en radon ont été log-transformées car elles ne suivent pas une loi normale (*p-value* du test de Shapiro < 0,05). Certaines variables explicatives n'ont pas été considérées pour cette analyse à cause de leur dépendance à d'autres caractéristiques. Les modèles sont estimés par le maximum de vraisemblance restreint (REML) avec l'algorithme de Newton-Raphson et la structure de covariance utilisée est $\sigma^2 I$. Les modalités de référence pour les variables qualitatives sont présentées en italique. L'écriture du modèle de régression est la suivante :

$$Y_{ij} = \beta_{0j} + \beta_1 X_{1ij} + \dots + \beta_p X_{pij} + \varepsilon$$

où : *i* représente la maison, *j* représente la campagne de mesure, *y* représente le logarithme des concentrations intérieures en radon, β_{0j} représente la constante pour chaque jeu de données, β_p avec $P = 1, \dots, p$ représente les paramètres estimés, X_{pij} représente la variable explicative pour l'observation *i* du jeu de données *j* et ε représente le résidu (l'erreur aléatoire). Les résidus du modèle présenté suivent une loi normale. Afin d'évaluer la qualité d'ajustement du modèle, plus précisément quelle part de variabilité des concentrations en radon est expliquée par la régression sur les variables explicatives, le R^2_1 de Snijders et Bosker a été calculé [15]. Le seuil de confiance a été fixé à 5 %.

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel SAS, version 9.3. Les analyses descriptives ont été réalisées sur l'ensemble des données (N = 6 010 maisons), tandis que la recherche des déterminants a été effectuée sur le jeu de données complet (n = 4 102 maisons).

Résultats

Concentrations intérieures en radon et caractéristiques des maisons

Le *tableau 1* présente la distribution des concentrations intérieures en radon dans les 6 010 maisons étudiées. La médiane est de 167 Bq.m⁻³ avec un 5^e percentile à 36 Bq.m⁻³ et un 95^e percentile à 1 161 Bq.m⁻³. La distribution des concentrations en radon est différente selon les trois campagnes (*p-value* du test de Kruskal Wallis < 0,0001). Les concentrations sont significativement plus élevées en Limousin avec une médiane à 221 Bq.m⁻³ et une moyenne à 499 Bq.m⁻³. Concernant les concentrations sur l'ensemble de la Bretagne, elles sont

Tableau 1. Distribution des concentrations intérieures en radon (Bq.m⁻³) et caractéristiques des maisons (N = 6 010).Table 1. Indoor radon concentrations (Bq.m⁻³) and characteristics of the 6,010 houses.

	n (%)	P5	Moyenne	Écart-type	Médiane	P95	Kruskal Wallis ^(a) Mann Whitney ^(b) Test de Dunn*
<i>Échantillon total</i>	6 010	36	355	753	167	1161	
Campagne de mesure							0,001
Concarneau Cornouaille Agglomération (CCA)	3 233 (54 %)	32	296	595	147	928	
Bretagne (B)	1 708 (28 %)	41	376	794	179	1 223	<i>B > CCA</i>
Limousin (L)	1 069 (18 %)	47	499	1 039	221	1 751	<i>L > CCA, B</i>
Potentiel du sol							0,003
Catégorie 1 (Cat1)	47 (1 %)	28	183	309	108	428	<i>Cat1 < Cat2, Cat3</i>
Catégorie 2 (Cat2)	49 (1 %)	31	239	214	167	717	
Catégorie 3 (Cat3)	5 900 (98 %)	36	356	759	167	1 175	
<i>Valeur manquante</i>	14 (0 %)	-	-	-	-	-	
Statut d'occupation							0,579
Propriétaire	5 605 (93 %)	36	359	771	167	1 172	
Locataire	343 (6 %)	36	288	357	152	1 100	
<i>Valeur manquante</i>	62 (1 %)	-	-	-	-	-	
Nombre de niveaux habités de la maison							< 0,001
1 niveau (1N)	1 103 (18 %)	32	321	604	145	1 144	<i>1N < 2N, 3N</i>
2 niveaux (2N)	4 059 (68 %)	36	336	660	165	1 092	
3 niveaux ou plus (3N)	686 (11 %)	49	492	1 171	223	1 424	
<i>Valeur manquante</i>	162 (3 %)	-	-	-	-	-	
Type de maison							0,282
Maison indépendante	5 129 (85 %)	36	356	762	166	1 172	
Maison mitoyenne	881 (15 %)	43	346	701	172	1 124	
Type de soubassement							< 0,001
Plancher sur terre-plein (TP)	2 150 (36 %)	43	390	745	196	1 215	<i>TP < TB</i>
Plancher sur vide sanitaire (VS)	1 041 (17 %)	26	220	488	104	664	<i>VS < TP, TB, SMA, D</i>
Sous-sol avec dallage (D)	1 051 (18 %)	35	359	847	151	1 223	<i>D < TP, TB</i>
Sous-sol en terre battue (TB)	245 (4 %)	85	509	1 131	217	1 776	
Soubassement mixte et autres (SMA)	844 (14 %)	38	354	669	173	1 270	
<i>Valeur manquante</i>	679 (11 %)	-	-	-	-	-	
Localisation du dosimètre							0,004
Sous-sol ou rez-de-jardin (SS)	620 (10 %)	39	458	1 288	178	1 351	
Rez-de-chaussée (RDC)	4 885 (81 %)	36	347	668	167	1 176	
Premier étage ou plus (E)	405 (7 %)	36	275	586	148	832	<i>E < RDC, SS</i>
<i>Valeur manquante</i>	100 (2 %)	-	-	-	-	-	
Murs enterrés ou semi-enterrés							< 0,001
Oui	1 874 (31 %)	40	409	803	186	1 483	
Non	4 136 (69 %)	35	330	728	160	1 058	<i>Non < Oui</i>
Réalisation de travaux d'extension							< 0,001
Oui	558 (9 %)	42	479	1 124	216	1 525	
Non	5452 (91 %)	36	342	703	162	1 114	<i>Non < Oui</i>
Période de construction							< 0,001
Avant 1948 (P1)	1836 (31 %)	66	527	1 034	261	1 688	
Entre 1949 et 1958 (P2)	402 (7 %)	55	417	596	220	1 457	<i>P2 < P1</i>
Entre 1959 et 1969 (P3)	522 (9 %)	40	307	544	176	817	<i>P3 < P1, P2</i>
Entre 1970 et 1974 (P4)	521 (9 %)	28	225	383	121	726	<i>P4 < P1, P2, P3</i>
Entre 1975 et 1982 (P5)	904 (15 %)	36	250	625	117	758	<i>P5 < P1, P2, P3</i>
Après 1982 (P6)	1562 (26 %)	29	248	562	112	785	<i>P6 < P1, P2, P3</i>
<i>Valeur manquante</i>	263 (4 %)	-	-	-	-	-	

Tableau 1. (Suite).

Table 1. (Continued).

	n (%)	P5	Moyenne	Écart-type	Médiane	P95	Kruskal Wallis ^(a) Mann Whitney ^(b) Test de Dunn*
Matériau principal de construction							< 0,001
Béton plein ou brique pleine (BP)	350 (6 %)	30	235	613	124	642	BP < GAP, M
Brique creuse ou parpaing (BC)	2594 (43 %)	31	340	460	117	795	BC < GAP, M
Granit et/ou autres pierres (GAP)	2071 (35 %)	61	514	1 006	255	1 651	
Autre	276 (5 %)	24	308	613	135	1 214	
Mixte avec granit et/ou autres pierres (M)	431 (7 %)	55	405	728	215	1 286	
Valeur manquante	288 (5 %)	-	-	-	-	-	
Type de vitrage des ouvrants							0,180
Simple vitrage	440 (7 %)	39	306	485	163	1 007	
Double vitrage	5310 (88 %)	36	359	773	166	1 171	
Autre	188 (3 %)	41	396	815	195	1 555	
Valeur manquante	72 (1 %)	-	-	-	-	-	
Système de ventilation							< 0,001
Pas de système (PS)	1388 (23 %)	42	437	799	215	1 426	
Ventilation naturelle (VN)	1 303 (22 %)	40	379	911	175	1 252	VN < PS
Ventilation mécanique contrôlée (VMC)	2 849 (47 %)	33	303	644	142	978	VMC < PS, VN
Autre	12 (0 %)	52	372	428	185	1 288	
Valeur manquante	458 (8 %)	-	-	-	-	-	
Travaux de ventilation							< 0,001
Oui	1 029 (17 %)	49	396	724	211	1 271	
Non	4 981 (83 %)	35	346	759	158	1 141	Non < Oui
Travaux d'isolation thermique							< 0,001
Oui	2 160 (36 %)	48	428	882	207	1 355	
Non	3 850 (64 %)	33	313	667	146	1 001	Non < Oui
Changement de fenêtres							< 0,001
Oui	3 138 (52 %)	44	406	832	205	1 288	
Non	2 872 (48 %)	32	298	651	131	982	Non < Oui

(a) la variable possède plus de deux modalités ; (b) la variable possède deux modalités ; * si le test de Kruskal Wallis ou U Mann Whitney est significatif (p -value < 0,05).

significativement plus élevées que celles en CCA. Les concentrations médianes sont respectivement de 179 Bq.m⁻³ et 147 Bq.m⁻³, et les moyennes de 376 Bq.m⁻³ et 296 Bq.m⁻³. La valeur du CCI est de 1 %, ce qui signifie que la majorité de la variabilité des concentrations a lieu entre les maisons. Néanmoins, la différence des distributions des concentrations en radon entre les trois campagnes confirme la nécessité de prendre en compte la variable « campagne de mesure » lors de la recherche multivariée des déterminants des concentrations intérieures en radon. La mise en perspective des concentrations mesurées avec le niveau de référence de 300 Bq.m⁻³ défini par la Directive 2013/59/Euratom [16] montre que celui-ci est dépassé dans 38 % des maisons en Limousin, 32 % des maisons en Bretagne et 25 % des maisons en CCA. Dans 10 % des maisons en Limousin, 7 % des maisons en Bretagne et 4 % des maisons en CCA, la valeur de 1 000 Bq.m⁻³ est dépassée.

L'échantillon est caractérisé par une forte proportion de propriétaires (93 %) et de maisons indépendantes

(85 %). Concernant le potentiel radon du sol, 98 % des maisons se situent sur une commune de catégorie 3. Le type de travaux le plus réalisé est un changement de fenêtres (52 %), suivi de travaux d'isolation thermique (36 %) et de travaux sur la ventilation (17 %).

Analyses bivariées

Le tableau 1 présente les résultats des analyses bivariées. Ces dernières montrent que toutes les caractéristiques de construction des bâtiments influencent les concentrations intérieures en radon, excepté le type de maison (indépendante ou mitoyenne) et le type de vitrage. Le statut d'occupation n'influence pas non plus les concentrations en radon.

Certaines variables sont liées entre elles (p -value du test du Chi-2 ou exact de Fisher < 0,05) telles que le type de maison avec le statut d'occupation, la période de construction avec le type de vitrage ou la réalisation d'une extension, le type de soubassement avec la présence de

murs enterrés. Ces dépendances entre les caractéristiques explicatives ne permettent pas d'introduire simultanément l'ensemble des variables dans l'analyse multivariée. Ainsi, le statut d'occupation, le type de vitrage, la réalisation d'une extension et la présence de murs enterrés n'ont pas été introduits dans l'analyse multivariée.

Déterminants des concentrations intérieures en radon

Le *tableau 2* présente les déterminants des concentrations intérieures en radon. Huit variables expliquent 20 % de la variabilité des concentrations intérieures en radon : le potentiel du sol, le type de soubassement, le matériau de construction, la période de construction, le nombre de niveaux habités, la localisation du dosimètre, un changement de fenêtres et le type de ventilation.

A contrario, la réalisation de travaux d'isolation thermique ou de travaux sur la ventilation, ainsi que le type de maison, indépendante ou mitoyenne, n'impactent pas les concentrations intérieures en radon.

Plus précisément, les maisons situées dans une commune avec un potentiel radon de catégorie 3 ou 2 ont des concentrations en radon significativement plus élevées que celles localisées dans une commune à potentiel radon de catégorie 1. Les maisons avec un dallage ou plancher sur vide sanitaire ont des concentrations significativement plus faibles que les autres maisons. La concentration médiane est de 104 Bq.m⁻³ pour les maisons avec un plancher sur vide sanitaire *versus* une concentration médiane de 151 Bq.m⁻³ au minimum pour les autres modalités. Les maisons construites entièrement ou en partie avec du granit et/ou des autres pierres ont des concentrations en radon significativement plus élevées que les maisons en brique creuse ou parpaing.

Tableau 2. Résultats de la régression linéaire multiniveaux sur le logarithme des concentrations en radon dans les maisons (n = 4 102).

Table 2. Results of the multilevel linear regression to explain indoor radon concentrations (n=4,102).

	β	SE	p-value
Constante	4,34	0,19	0,002
Potentiel du sol (réf. : catégorie 1)			
Catégorie 2	0,53	0,23	0,021
Catégorie 3	0,69	0,17	< 0,001
Type de soubassement (réf. : dallage ou plancher sur vide sanitaire)			
Dallage ou plancher sur terre-plein	0,39	0,04	< 0,001
Sol de la cave avec dallage	0,29	0,05	< 0,001
Sol de la cave en terre battue	0,44	0,08	< 0,001
Soubassement mixte et autres	0,25	0,05	< 0,001
Matériau de construction (réf. : brique creuse ou parpaing)			
Autres ou un mixte sans granit et/ou autres pierres	0,02	0,07	0,748
Mixte avec granit et/ou autres pierres	0,20	0,07	0,004
Béton plein ou brique pleine	-0,01	0,06	0,936
Granit et/ou autres pierres	0,36	0,06	< 0,001
Période de construction (réf. : avant 1948)			
Entre 1949 et 1958	0,05	0,07	0,440
Entre 1959 et 1969	-0,12	0,07	0,069
Entre 1970 et 1974	-0,31	0,07	< 0,001
Entre 1975 et 1982	-0,31	0,07	< 0,001
Après 1982	-0,27	0,07	< 0,001
Nombre de niveaux habités (réf. : 1 niveau)			
2 niveaux	-0,01	0,04	0,725
3 niveaux ou plus	0,15	0,06	0,012
Localisation du dosimètre (réf. : rez-de-chaussée)			
Premier étage ou plus	-0,23	0,07	0,001
Sous-sol ou rez-de-jardin	0,08	0,05	0,102
Changement de fenêtres (réf. : non)			
	0,07	0,04	0,047
Système de ventilation (réf. : aucun système)			
Ventilation naturelle	-0,12	0,04	0,006
Ventilation mécanique contrôlée (VMC)	-0,14	0,04	0,001

réf. : modalité de référence ; β (SE) : paramètre estimé (erreur standard) ; $R_1^2 = 0,20$; AIC (Akaike Information Criterion) = 11 344 ; σ^2 (variance résiduelle) = 0,91 ; τ^2 (variance du niveau 1) = 0,01.

Les concentrations médianes sont de 117 Bq.m⁻³ pour les maisons en brique creuse ou parpaing, 215 Bq.m⁻³ pour celles avec un mixte incluant du granit et/ou d'autres pierres et 255 Bq.m⁻³ pour celles uniquement en granit et/ou autres pierres. Les maisons construites après 1970 (concentration médiane voisine de 120 Bq.m⁻³) ont des concentrations significativement plus faibles que celles construites avant 1948 (concentration médiane de 261 Bq.m⁻³). Les maisons habitées sur trois niveaux ou plus ont des concentrations plus élevées que celles habitées sur un niveau. Par ailleurs, les concentrations mesurées au premier étage ou à un niveau supérieur sont significativement plus faibles que celles mesurées en rez-de-chaussée. Le type de ventilation impacte significativement les concentrations intérieures en radon : les maisons équipées d'une ventilation naturelle ou d'une ventilation mécanique contrôlée (VMC) ont des concentrations en radon significativement plus faibles que les maisons sans système de ventilation où le renouvellement d'air ne repose que sur l'ouverture des fenêtres et les défauts d'étanchéité. Enfin, les maisons dans lesquelles un changement de fenêtres a été réalisé ont des concentrations significativement plus élevées que celles sans changement.

Discussion

Cette étude est la première d'une telle ampleur conduite en France. Elle conforte des résultats déjà largement connus comme l'influence du potentiel du sol [5] et celle du type de soubassement [5] sur les concentrations intérieures en radon. En revanche, pour la première fois, l'influence du changement de fenêtres est montrée. En effet, les fenêtres sont généralement changées pour améliorer l'étanchéité à l'air de l'enveloppe du bâtiment et ainsi améliorer le confort thermique et économiser l'énergie. Cette étanchéité renforcée induit une diminution du renouvellement d'air du bâtiment associé aux défauts d'étanchéité et peut augmenter la dépression du bâtiment, favorisant ainsi l'entrée du radon *via* le sol et les défauts d'étanchéité à ce niveau [17, 18]. Sans une vigilance particulière sur la ventilation du logement en cas de changement de fenêtres, la concentration intérieure en radon se trouve augmentée. À l'heure où la rénovation énergétique est encouragée par les pouvoirs publics, ce résultat est à considérer avec attention. Toute rénovation énergétique des logements doit impérativement être accompagnée d'une vigilance sur les moyens d'aération du logement.

Malgré sa puissance statistique, cette analyse possède néanmoins quelques limites. La fiabilité des réponses, fournies par le questionnaire auto-administré, peut être questionnée, en particulier pour les questions les plus techniques telles que le système de ventilation et

le type de soubassement. Le jeu de données, plus de 6 000 maisons, permet cependant de minimiser cet impact. Par ailleurs, la régression linéaire multiniveaux ne permet pas de prendre en compte l'ensemble des variables à cause de la dépendance de certaines caractéristiques. L'influence du type de vitrage, du statut d'occupation, de la réalisation d'une extension de la maison et de la présence de murs enterrés n'a ainsi pas pu être évaluée dans l'analyse multivariée. Pour une future étude, il serait intéressant de stratifier l'échantillon en fonction de ces caractéristiques. Enfin, le modèle statistique explique 20 % de la variabilité des concentrations intérieures en radon ; 80 % de la variabilité n'est pas expliquée. Cette variabilité non expliquée peut provenir de phénomènes aléatoires ou d'autres caractéristiques non renseignées dans la base de données. Il est connu que la première source de radon est le sol. Or, la variable utilisée pour représenter l'émission du sol est catégorisée en trois groupes et ne permet certainement pas d'apporter une information suffisamment précise sur la teneur en radon du sol.

Conclusion

Les concentrations intérieures en radon varient fortement dans l'échantillon des 6 010 maisons étudiées (5^e percentile : 36 Bq.m⁻³, et 95^e percentile : 1 161 Bq.m⁻³). L'analyse multivariée met en avant l'influence des caractéristiques suivantes sur les concentrations intérieures en radon : le potentiel du sol, le type de soubassement, le matériau de construction principal, la période de construction, le nombre de niveaux habités, la localisation du dosimètre, le changement de fenêtres et le système de ventilation. Cette étude conforte ainsi des déterminants du radon déjà connus et met en évidence d'autres variables moins étudiées, comme le type de ventilation, ou bien non identifiées à ce jour comme pouvant influencer la concentration en radon, comme le changement de fenêtres. À l'heure où la rénovation énergétique *via* la réduction de la perméabilité de l'enveloppe des bâtiments devient une nécessité pour économiser l'énergie, il est impératif de sensibiliser les professionnels et le grand public à la gestion de la ventilation. ■

Remerciements et autres mentions

Les auteurs remercient la CLCV (Consommation, logement et cadre de vie), l'Agence régionale de santé de Bretagne et la délégation départementale du Finistère, ainsi que l'Agence régionale de santé du Limousin et les centres permanents d'initiatives pour l'environnement de Corrèze et de Creuse, pour la fourniture des données.

Financement : Cette étude a été financée par la Direction générale de la santé du ministère chargé de la Santé (Convention DGS-CSTB 2016) : **liens d'intérêts** : les auteurs déclarent ne pas avoir de lien d'intérêt.

Références

1. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN). *Exposition de la population française aux rayonnements ionisants*. Fontenay-aux-Roses : IRSN, 2016.
2. World Health Organization (WHO). *WHO handbook on indoor radon*. Geneva : World Health Organization, 2009.
3. Catelinois O, Rogel A, Laurier D, et al. Lung cancer attributable to indoor radon exposure in France: impact of the risk models and uncertainty analysis. *Environ Health Perspect* 2006 ; 114 : 1361-6.
4. Boulanger G, Bayeux T, Mandin C, et al. Socio-economic costs of indoor air pollution: a tentative estimation for some pollutants of health interest in France. *Env Int* 2017 ; 104 : 14-24.
5. Demoury C, Ielsch G, Hemon D, et al. A statistical evaluation of the influence of housing characteristics and geogenic radon potential on indoor radon concentrations in France. *J Environ Radioact* 2013 ; 126 : 216-25.
6. Collignan B, Le Ponner E, Mandin C. Relationships between indoor radon concentrations, thermal retrofit and dwelling characteristics. *J Environ Radioact* 2016 ; 165 : 124-30.
7. Clinard F, Collange F, Catelinois O, et al. Residential radon concentrations in Franche-Comte, a high radon region of France. *Environ Risque Sante* 2016 ; 15 : 126-34.
8. Sundal AV, Henriksen H, Soldal O, Strand T. The influence of geological factors on indoor radon concentrations in Norway. *Sci Total Environ* 2004 ; 328 : 41-53.
9. Bochicchio F, Z unić ZS, Carpentieri C, et al. Radon in indoor air of primary schools: a systematic survey to evaluate factors affecting radon concentration levels and their variability. *Indoor Air* 2014 ; 24 : 315-26.
10. Borgoni R, De Francesco D, De Bartolo D, Tzavidis N. Hierarchical modeling of indoor radon concentration: how much do geology and building factors matter? *J Environ Radioact* 2014 ; 138 : 227-37.
11. Chen J, Ford KL. A study on the correlation between soil radon potential and average indoor radon potential in Canadian cities. *J Environ Radioact* 2017 ; 166 : 152-6.
12. ISO. Measurement of radioactivity in the environment – Air: radon-222 – Part 8: Methodologies for initial and additional investigations in buildings. In : *ISO 11665-8*. ISO, 2013.
13. ISO. Measurement of radioactivity in the environment – Air: radon-222 – Part 4: Integrated measurement method for determining average activity concentration using passive sampling and delayed analysis. In : *ISO 11665-4*. ISO, 2012.
14. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (INRS). *Connaître le potentiel radon dans ma commune*. <http://www.irsn.fr/FR/connaissances/Environnement/expertises-radioactivite-naturelle/radon/Pages/Le-radon.aspx> [consulté le 30 mars 2017].
15. Snijders TAB, Bosker RJ. *Multilevel analysis – An introduction to basic and advanced multilevel modeling*. CA, United States : Sage, Thousand Oaks, 2012.
16. Council Directive 2013/59/Euratom of 5th December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom. *Off J Eur Union* 2014.
17. Arvela H, Holmgren O, Reisbacka H, Vinha J. Review of low-energy construction, air tightness, ventilation strategies and indoor radon: results from Finnish houses and apartments. *Radiat Prot Dosimetry* 2014 ; 162 : 351-63.
18. Collignan B, Powaga E. Impact of ventilation systems and energy savings in a building on the mechanisms governing the indoor radon activity concentration. *J Environ Radioact* 2017 ; 196 : 268-73.