

Santé environnement

Les niveaux de radon et leurs déterminants dans les logements de France métropolitaine continentale



Observatoire de la qualité de
l'air intérieur



INSTITUT
DE VEILLE SANITAIRE

Sommaire

Abréviations	2
1. Contexte	3
2. Matériel et méthodes	4
2.1 Campagne nationale « Logements » de l'OQAI	4
2.1.1 Type et période d'étude	4
2.1.2 Données recueillies	4
2.1.3 Mesures du radon et de rayonnement gamma	5
2.2 Redressement pour prendre en compte les concentrations en radon manquantes	5
2.3 Prise en compte de la nature du sol par logement	5
2.4 Analyse statistique	6
2.4.1 Niveaux de concentration en radon domestique	6
2.4.2 Déterminants de la concentration en radon domestique	6
2.4.3 Corrélations entre la concentration en radon et celle des autres polluants	7
3. Résultats	7
3.1 Niveaux de concentration en radon domestique dans les résidences principales	7
3.2 Déterminants de la concentration en radon domestique	8
3.3 Corrélations entre la concentration en radon et les autres polluants	13
4. Discussion	14
5. Conclusion et perspectives	17
Références bibliographiques	18
Annexes	21

Les niveaux de radon et leurs déterminants dans les logements de France métropolitaine continentale

Ce travail a été réalisé par l'Institut de veille sanitaire (InVS) à partir des données issues de la campagne nationale « Logements – État de la qualité de l'air dans les logements français » menée par l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI) entre octobre 2003 et novembre 2005.

Auteurs

Jean-Christophe Paillard, Département santé environnement (DSE), (InVS)

Candice Roudier, DSE, InVS

Lydéric Aubert, DSE, InVS

Blandine Vacquier, DSE, InVS

Contributeurs

Dominique Laurier, Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN)

Jean-Paul Lucas, Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB)

Corinne Mandin, CSTB

Abdelkrim Zeghnoun, DSE, InVS

Relecteurs

Olivier Catelinois, DSE, InVS

Pascal Empereur-Bissonnet, DSE, InVS

Agnès Lefranc, DSE, InVS

Séverine Kirchner, CSTB

Bernard Collignan, CSTB

Relecteurs extérieurs

Jérôme Guillevic, IRSN

Géraldine Ielsch, IRSN

Remerciements

Roselyne Améon, IRSN

Alain Le Tertre, DSE, InVS

Abdessattar Saoudi, DSE, InVS

Abréviations

ACM	Analyse des correspondances multiples
ACP	Analyse en composantes principales
Bq.m⁻³	Becquerel par mètre cube
BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières
Cire	Cellule de l'InVS en région
CIPR	Commission internationale de protection radiologique
Circ	Centre international de recherche sur le cancer
CO	Monoxyde de carbone
CO₂	Dioxyde de carbone
COV	Composé organique volatil
CSTB	Centre scientifique et technique du bâtiment
DSE	Département santé environnement
ERP	Établissement recevant du public
IC_{95%}	Intervalle de confiance à 95 %
InVS	Institut de veille sanitaire
IRSN	Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire
OMS	Organisation mondiale de la santé
OQAI	Observatoire de la qualité de l'air intérieur

1. Contexte

Le radon est un gaz radioactif inodore et incolore, provenant de la désintégration naturelle de l'uranium présent dans la croûte terrestre. Il s'accumule dans les espaces clos et peut se retrouver, par effet de confinement, à de fortes concentrations à l'intérieur des logements. Pour la population française, l'exposition au radon constitue, avant l'exposition médicale, la première source d'exposition aux rayonnements ionisants et représente en moyenne 59 % de la dose due aux rayonnements d'origine naturelle [1].

En se désintégrant, le radon et ses descendants émettent des particules alpha qui, une fois inhalées, peuvent endommager l'épithélium bronchique. Les risques pour la santé liés à l'inhalation du radon et de ses descendants ont été clairement établis à partir de nombreuses études menées chez l'homme et chez l'animal [2,3]. Le Centre international de recherche sur le cancer (Circ) a ainsi classé le radon comme cancérigène pulmonaire certain pour l'homme en 1988 [4]. Selon les résultats d'une évaluation quantitative des risques sanitaires menée par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) en 2006, entre 1 234 et 2 913 décès par cancer du poumon seraient attribuables chaque année à l'exposition domestique au radon en France, soit entre 5 et 12 % des décès par cancer du poumon observés [5]. Ainsi, l'exposition au radon représenterait le second facteur de risque du cancer du poumon après le tabac. Par ailleurs, plusieurs auteurs ont suggéré que l'inhalation du radon pouvait également être un facteur de risque de la leucémie car une dose non négligeable de rayonnements ionisants est aussi délivrée à la moelle osseuse [6]. Néanmoins, à ce jour, l'existence d'un risque de leucémie associé à l'inhalation de radon n'a pas été clairement démontrée [7-11].

Une cartographie de l'exposition au radon dans l'habitat en France métropolitaine a été dressée par l'IRSN avec plus de 12 000 mesures réalisées dans des logements entre 1990 et 2001. L'exposition moyenne au radon en France était de 63 Bq.m^{-3} après ajustement sur le facteur saisonnier, sur les caractéristiques des logements et sur la densité de population [12]. Un travail a été réalisé par l'IRSN en 2011-2013 [13], afin de caractériser les déterminants de la concentration en radon dans l'habitat à partir de ces campagnes de mesure de radon et de la cartographie du potentiel radon géogénique réalisée en 2008-2010 [14].

Selon les données de la littérature, plusieurs déterminants sont susceptibles de faire varier les concentrations en radon à l'intérieur du logement. Parmi eux, les caractéristiques relatives à la géologie des sols (nature et perméabilité du sol, porosité des roches sous-jacentes au logement, présence de failles...) sont connues pour favoriser le transfert du radon dans les logements [15-19]. Les matériaux de construction des bâtiments, le renouvellement d'air mais aussi le mode de vie des occupants peuvent également influencer sur l'accumulation de radon à l'intérieur des logements [15;17-22]. Enfin, les conditions climatiques et atmosphériques (saison, vitesse du vent, pression atmosphérique, humidité, température...) participent également à la modification des concentrations en radon domestique [23,24]. La prise en compte de ces facteurs influant sur la concentration en radon domestique permet de fournir aux pouvoirs publics des éléments utiles à la politique de gestion du risque lié à ce gaz cancérigène.

En France, le pourcentage de temps passé quotidiennement à l'intérieur des logements est en moyenne de 67 % pour l'ensemble de la population [25]. Ainsi les niveaux de radon dans l'habitat représentent un déterminant majeur de l'exposition individuelle.

Dans ce contexte, nous avons étudié les déterminants de la concentration du radon dans l'habitat, dans le cadre de la campagne nationale de mesure de la qualité de l'air intérieur menée par l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI), entre 2003 et 2005 [26]. Cette campagne avait pour but de dresser un premier état de la qualité de l'air intérieur représentatif de la situation des 24 millions de résidences principales en France métropolitaine et continentale.

Les objectifs de notre étude sont tout d'abord de dresser un état des niveaux de radon dans les logements français, puis d'étudier les déterminants susceptibles d'influer sur ces niveaux et enfin

d'analyser la corrélation entre la concentration de radon et celles des autres polluants domestiques mesurés lors de la campagne de l'OQAI.

2. Matériel et méthodes

2.1. Campagne nationale « Logements » de l'OQAI

2.1.1 Type et période d'étude

Les données étaient issues de la campagne nationale de mesure de la qualité de l'air intérieur dirigée par l'OQAI entre le 1^{er} octobre 2003 et le 21 décembre 2005 sur un échantillon représentatif des 24 millions de résidences principales de France (excepté les départements ultramarins et la Corse).

Il s'agissait d'une enquête transversale dont l'échantillon a été sélectionné à partir d'un plan de sondage à trois degrés. Un redressement a été effectué en utilisant la méthode Calmar [27] sur le type de logement, la période de construction, le statut d'occupation (propriétaire, locataire, hébergé, etc.), la région d'échantillonnage, la tranche de taille d'unité urbaine, la zone climatique d'hiver et la zone de confort d'été. Les données sont décrites dans le rapport de l'OQAI [26].

Au final, l'échantillon était constitué de 567 logements enquêtés répartis dans 74 communes, 50 départements et 19 régions de France métropolitaine continentale (annexe 1).

2.1.2 Données recueillies

Les données collectées par l'OQAI regroupaient des données relatives aux différents polluants mesurés, aux paramètres de confort et de confinement, aux caractéristiques techniques des logements et leur environnement ainsi que des informations sur les ménages, leurs activités et le temps passé au contact de la pollution.

Une trentaine de polluants chimiques, physiques et microbiologiques de l'air ont été mesurés dans chaque résidence principale : les composés organiques volatils (COV), le dioxyde de carbone (CO₂) et les allergènes d'acariens ont été mesurés dans la chambre. Les concentrations en PM_{2,5} et PM₁₀ (particules de diamètre inférieur à 2,5 et 10 µm), ainsi que les allergènes de chat et de chien ont été mesurés dans le séjour. Le monoxyde de carbone (CO) a été mesuré dans le séjour et dans toutes les pièces équipées d'un appareil à combustion. La température et l'humidité relative ont été mesurées dans la chambre et dans le séjour. Le débit d'air extrait a été mesuré à toutes les bouches d'extraction des systèmes de ventilation naturelle par conduit ou de ventilation mécanique contrôlée dans les pièces humides du logement (cuisine, salle de bain, de douche, toilettes). Les COV, le CO, les particules, la température, l'humidité relative et le CO₂ ont été mesurés pendant 7 jours. Les allergènes d'acariens ont été prélevés pendant 5 à 10 minutes, les allergènes de chat et de chien pendant 1 heure et les rayonnements gamma pendant 45 minutes.

Complémentaires aux paramètres de pollution, des informations relatives aux sources d'émission ont été collectées au domicile par des enquêteurs soit en interrogeant l'occupant, soit à partir des observations du technicien enquêteur afin de conforter, identifier ou estimer la part des différents facteurs de risques comportementaux ou environnementaux. Les données concernant la date et les matériaux de construction des logements, les équipements intérieurs, et les habitudes de vie des occupants comme le statut tabagique ont ainsi été recueillies.

Les paramètres suivants ont été calculés à partir des données collectées : la densité d'occupation du logement qui correspond au rapport entre le nombre d'habitants et la surface du logement ; le taux de joint aux fenêtres, correspondant au rapport du nombre de menuiseries avec joint sur le nombre total de menuiseries à l'intérieur du logement ; le taux de renouvellement de l'air, calculé à partir du taux de dioxyde de carbone dans l'air intérieur et de l'aération du logement.

2.1.3 Mesures du radon et de rayonnement gamma

Les protocoles de mesure du radon et du rayonnement gamma ont été élaborés par l'IRSN et l'InVS. La concentration en radon à l'intérieur des logements a été mesurée à partir de l'accumulation de traces de rayonnements alpha issus du radon et de ses descendants sur un film en nitrate de cellulose de 12 µm d'épaisseur (dosimètre Kodalpha) [28].

Deux dosimètres ouverts par un technicien-enquêteur ont été exposés pendant 60 jours dans l'une des chambres et dans le séjour, selon la norme Afnor NF M60-771. Les dosimètres ont ensuite été renvoyés par les occupants à l'OQAI qui les a transmis au laboratoire *Dosirad* pour lecture. Les données brutes ont été transmises à l'IRSN afin d'être validées avant d'être intégrées dans la base de données de l'OQAI.

La mesure du rayonnement gamma a été réalisée par l'intermédiaire d'un radiamètre, étalonné par l'IRSN. Ce détecteur enregistre un débit de dose externe moyen sur une période de temps donnée. Il a été mis en marche par le technicien-enquêteur dans le séjour pendant une durée de 45 minutes.

Afin de prendre en compte les variations saisonnières de la concentration en radon au sein des logements, un facteur de correction saisonnier a été appliqué selon la méthode décrite par Baysson, *et al.* en 2003 [29].

2.2. Redressement pour prendre en compte les concentrations en radon manquantes

La totalité des 567 logements enquêtés dans la campagne nationale de l'OQAI ne dispose pas *in fine* de mesure de radon (du fait de problème de prélèvement ou d'analyse). Une repondération a donc été effectuée afin que le sous-échantillon de logements enquêtés pour lesquels au moins une mesure de radon était disponible soit représentatif de l'ensemble des 24 millions de résidences principales de France métropolitaine continentale. La méthode de repondération s'est basée sur le mécanisme de réponse homogène à l'intérieur de sous-populations [30].

La population d'étude a été divisée en deux sous-populations selon la présence ou l'absence de mesure de radon. Un test du χ^2 a ensuite été réalisé entre chaque modalité des variables explicatives au sein de ces deux sous-populations. Les variables explicatives ont été sélectionnées *a priori* : variables sur lesquelles le redressement de l'échantillon initial a été effectué (région d'échantillonnage, type de logement, statut d'occupation du logement, ressource principale du ménage, année de construction du logement, âge de la personne de référence, nombre de personnes dans le ménage, et tranche d'unité urbaine), ainsi que les variables influençant les concentrations en radon d'après la littérature (saison, étage, matériau de construction des murs). Les variables pour lesquelles le p du test du χ^2 était inférieur à 0,30 ont été incluses dans un modèle de régression logistique. Il s'agissait des variables suivantes : le statut d'occupation du logement, la saison et la région d'échantillonnage. Le croisement des modalités de ces trois variables a permis de constituer des groupes de sous-populations homogènes pour chacune desquelles la probabilité de présence d'une mesure de radon a été calculée. Chaque logement a ainsi été assigné d'un nouveau poids de sondage en multipliant le poids de sondage initial par l'inverse de la probabilité de présence de mesure de radon selon la sous-population auquel appartenait le logement.

2.3 Prise en compte de la nature du sol par logement

Une variable caractérisant la nature du sol sous-jacent à chaque logement enquêté a été créée en utilisant l'outil « InfoTerre » du site internet du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) [31].

À partir des coordonnées Lambert de chaque logement, placées directement sur la carte géologique « InfoTerre » définie au 1/50 000, la couche géologique sous-jacente a été recueillie. La géologie du sol a ensuite été regroupée selon les 4 grandes classes suivantes : sédimentaire, magmatique non granitique, magmatique granitique et métamorphique.

2.4 Analyse statistique

Les variables ont été décrites par leur fréquence et leur pourcentage pondéré. Les variables quantitatives discrètes ont été considérées comme des variables qualitatives ordonnées et ont également été décrites par leurs effectifs et les pourcentages pondérés pour chaque modalité.

Le plan de sondage, la stratification et le facteur de pondération ont été pris en compte dans l'ensemble de l'analyse statistique.

2.4.1 Niveaux de concentration en radon domestique

Les concentrations en radon dans chaque pièce ont été décrites par leur moyenne arithmétique rapportée avec leur intervalle de confiance à 95 % (IC_{95%}). L'intensité de la relation linéaire entre les mesures de radon effectuées dans le séjour et celles réalisées dans la chambre a été déterminée par le calcul du coefficient de corrélation de Pearson. Le coefficient de corrélation des rangs de Spearman a également été calculé dans le but de repérer les corrélations monotones. La répartition de la différence entre les deux mesures a été présentée sur un qqplot¹.

Lorsque deux mesures étaient disponibles pour un même logement, la moyenne de la concentration en radon des deux pièces, corrigée de l'effet saison, a été considérée dans le reste de l'analyse.

La distribution de la concentration moyenne en radon a été étudiée. La distribution log-normale a été vérifiée graphiquement par la courbe de densité. Les quantiles estimés ont été comparés à ceux d'une distribution log-normale théorique et représentés graphiquement sur un qqplot.

2.4.2. Déterminants de la concentration en radon domestique

La concentration en radon a été décrite selon les caractéristiques du logement. Du fait de la distribution log-normale de la concentration en radon, les résultats ont été présentés par leur moyenne géométrique et leur IC_{95%}. À titre descriptif, la médiane ainsi que les valeurs minimale et maximale sont également présentées.

Dans un second temps, un modèle de régression linéaire généralisé a été utilisé afin de déterminer les facteurs influençant les niveaux de radon mesurés à l'intérieur des logements.

Une matrice des corrélations et une analyse des correspondances multiples (ACM) ont été réalisées, afin de sélectionner les variables à inclure dans le modèle de régression linéaire. Les variables quantitatives ont été incluses dans la matrice des corrélations en utilisant les fonctions spline dans le but de prendre en compte l'éventuel effet non linéaire de ces variables. Pour l'ACM qui incluait toutes les variables qualitatives d'intérêt, une analyse a été effectuée afin d'évaluer graphiquement la proximité des différentes variables et d'identifier ainsi des groupes homogènes de modalités. Pour cette méthode, la concentration en radon a été subdivisée *a priori* en trois classes (« Moins de 50 Bq.m⁻³ », « Entre 50 et 100 Bq.m⁻³ » et « Plus de 100 Bq.m⁻³ ») et a fait figure de variable illustrative sur le graphique.

Une analyse multivariée a ensuite été réalisée afin de caractériser les principaux déterminants des concentrations en radon dans l'habitat. Cette analyse a nécessité d'effectuer une transformation logarithmique de la concentration moyenne en radon, afin de normaliser la distribution. Les variables incluses dans le modèle ont été définies *a priori* ou sélectionnées d'après les résultats de la matrice des corrélations et de ceux de l'ACM. La période de construction, la cave ou le garage communiquant avec le logement, les matériaux de construction, la géologie du sol sous-jacent au logement et la saison étant des déterminants d'exposition au radon connus de la littérature, ces variables ont ainsi été incluses *a priori* dans le modèle.

¹ Un qqplot compare les données observées aux données théoriques si elles suivaient une distribution normale. Les valeurs observées et idéales sont comparées sur un graphe X-Y qui doit montrer une tendance linéaire en cas de normalité.

Les variables quantitatives ont été transformées en variables à deux modalités (inférieure ou supérieure à la médiane) afin de prendre en compte d'éventuelles variations intra résiduelles. Les variables quantitatives concernées sont la température, l'humidité relative, le taux de renouvellement de l'air, le taux de simple vitrage, le taux de joint aux fenêtres et la densité d'occupation.

La matrice des covariances des estimateurs a permis d'étudier la colinéarité entre les variables et ainsi d'affiner la sélection de variables dans le modèle final.

Chacune des variables explicatives a été individuellement retirée du modèle global, puis chaque modèle intermédiaire a été comparé au modèle complet à l'aide d'une analyse de variance. Les *p-values* résultant de chacune des analyses de variance ont été présentées. L'adéquation du modèle final (R^2), correspondant au pourcentage de variabilité des concentrations en radon expliqué par les variables incluses dans le modèle, a été estimée.

2.4.3. Corrélations entre la concentration en radon et celle des autres polluants

La corrélation entre la concentration en radon et celle des autres polluants mesurés a été calculée selon la pièce où la mesure a été faite. Les polluants mesurés dans la chambre ont été représentés sur une analyse de composantes principales (ACP), du fait de leur nombre important. Les polluants mesurés dans le séjour ont été représentés sur une matrice des corrélations. Le poids de sondage a été pris en compte dans chacune de ces analyses.

La préparation des bases de données, l'analyse bivariée et l'ACM ont été réalisées sous le logiciel SAS version 9.1. La comparaison de la distribution observée à une distribution log-normale (qqplot), les matrices des corrélations, l'ACP, le modèle de régression et l'étude des résidus ont été réalisés sous le logiciel R version 2.13.0. L'ensemble des analyses ont été réalisées en utilisant le programme Survey qui permet de prendre en compte le plan de sondage sous les logiciels SAS et R.

3. Résultats

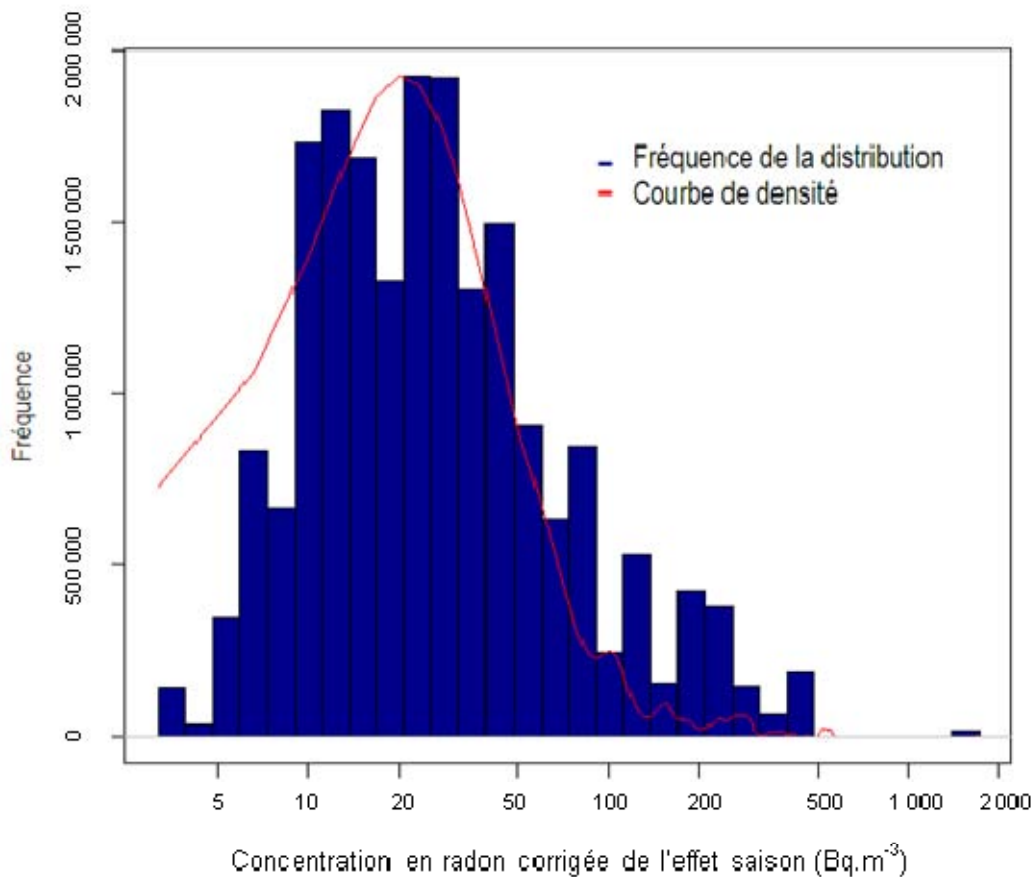
3.1 Niveaux de concentration en radon domestique dans les résidences principales

Au total, 457 mesures de concentration en radon ont été réalisées dans le séjour et 463 dans la chambre principale. La concentration moyenne de radon corrigée de l'effet saison était respectivement de 65 Bq.m^{-3} [IC_{95%} : 51 ; 78] dans le séjour et de 59 Bq.m^{-3} [IC_{95%} : 50 ; 68] dans la chambre. Les maxima ($1\,215 \text{ Bq.m}^{-3}$ dans la chambre et $2\,161 \text{ Bq.m}^{-3}$ dans le séjour) ont été observés dans le même logement.

Deux mesures de radon étaient disponibles pour 448 logements. Le coefficient de corrélation des rangs de Pearson entre les deux mesures était de 0,83 ($p < 0,001$) et le coefficient de corrélation de Spearman de 0,80 ($p < 0,001$). La répartition de la différence entre la mesure réalisée dans le séjour et celle dans la chambre était proche de zéro. Dans le reste de l'analyse, quand deux mesures étaient disponibles pour un logement, la concentration moyenne en radon entre les deux pièces a été considérée. Au total, l'échantillon final était constitué de 472 logements, soit 83 % des résidences principales incluses dans la campagne de l'OQAI.

La figure 1 présente la distribution des niveaux de radon corrigée de l'effet de saison dans les logements français métropolitains et sa courbe de densité. La distribution log-normale de la concentration en radon a été estimée graphiquement par la courbe de densité. La représentation graphique des quantiles observés et de ceux issus d'une distribution log-normale théorique a mis en évidence une relation linéaire confirmant la distribution log-normale de la concentration moyenne en radon. La moyenne arithmétique de la concentration en radon domestique était de 61 Bq.m^{-3} [IC_{95%} : 50 ; 71] et la moyenne géométrique de 37 Bq.m^{-3} [IC_{95%} : 33 ; 41]. La médiane était de 33 Bq.m^{-3} , le 5^e et le 95^e percentiles étaient respectivement de 11 Bq.m^{-3} et de 238 Bq.m^{-3} .

Figure 1. Distribution de la concentration en radon dans les résidences principales de France métropolitaine (campagne nationale logements de l'OQAI ; 2003-2005, données pondérées et corrigées de l'effet de saison)



3.2 Déterminants de la concentration en radon domestique

Le tableau 1 présente les concentrations en radon selon les caractéristiques des résidences principales, la saison à laquelle a été effectuée la mesure de radon et la géologie du sol sous-jacent.

Les maisons individuelles présentaient une concentration moyenne géométrique en radon plus élevée que les logements collectifs (52 *versus* 23 Bq.m⁻³). La concentration en radon décroissait avec l'étage auquel se situait la résidence principale avec respectivement une valeur de 48 Bq.m⁻³ pour les logements situés au rez-de-chaussée et de 23 Bq.m⁻³ pour ceux situés au quatrième étage et plus.

Les résidences principales dont les murs étaient constitués de granite présentaient une concentration moyenne en radon de 285 Bq.m⁻³, alors qu'elle était de 24 Bq.m⁻³ pour celles dont les murs étaient constitués de béton. Par ailleurs, les logements construits sur un sol de nature granitique avaient des concentrations moyennes en radon plus importantes que ceux construits sur un sol sédimentaire (106 *versus* 33 Bq.m⁻³).

Les logements ne disposant d'aucun dispositif de chauffage, bien qu'étant considérés comme résidences principales, présentaient des concentrations plus élevées que ceux en disposant et ce, que le chauffage soit central collectif, urbain, électrique ou central individuel. Pour les logements équipés d'une cheminée, la concentration moyenne en radon valait 56 Bq.m⁻³, alors qu'elle diminuait jusqu'à 30 Bq.m⁻³ pour ceux qui n'en étaient pas équipés. Enfin, les logements pour lesquels les mesures en radon avaient été effectuées en hiver présentaient des concentrations plus élevées que ceux pour lesquels les mesures avaient été réalisées aux autres saisons.

Tableau 1. Concentrations en radon selon les caractéristiques des résidences principales et la saison en France métropolitaine (campagne nationale logements de l'OQAI ; 2003-2005, données pondérées)

Variables	Fréquence	Pourcentage pondéré	Moyenne géométrique [IC _{95%}]*	Min	Médiane	Max
Ensemble de l'échantillon	472	100 %	37 [33 ; 41]	6	32	1 549
Type de logement						
Maison individuelle	299	57,6 %	52 [44 ; 61]	7	48	1 549
Collectif	173	42,4 %	23 [20 ; 26]	6	19	603
Période de construction						
Avant 1948	150	31,5 %	45 [36 ; 57]	6	46	1 549
Entre 1949 et 1967	80	17,2 %	30 [24 ; 36]	7	26	303
Entre 1968 et 1981	110	27,5 %	31 [27 ; 36]	7	30	308
Après 1982	132	23,8 %	40 [31 ; 51]	7	31	508
Étage du logement						
Rez-de-chaussée	292	58,9 %	48 [41 ; 55]	7	43	1 549
1 ^{er} étage	62	14,1 %	29 [23 ; 36]	6	13	249
2 ^e et 3 ^e étages	63	15,4 %	21 [18 ; 24]	6	17	270
4 ^e étage et plus	39	8,6 %	23 [17 ; 30]	7	19	100
Manquant	16	3,0 %	†	†	†	†
Matériaux de construction des murs						
Bois	8	2,3 %	102 [51 ; 205]	8	67	508
Brique	97	22,8 %	36 [27 ; 47]	6	33	308
Béton	136	31,1 %	24 [22 ; 27]	7	19	270
Parpaing	120	23,6 %	38 [33 ; 45]	8	35	460
Granit	6	1,5 %	285 [266 ; 306]	25	268	603
Pierre	90	16,5 %	58 [43 ; 78]	8	58	1 549
Autre	12	1,8 %	34 [26 ; 45]	12	31	111
Manquant	3	0,4 %	†	†	†	†
Nombre de résidents par logement						
1	80	30,2 %	34 [27 ; 43]	6	29	603
2	165	35,0 %	38 [33 ; 43]	6	34	1 549
3	72	14,0 %	33 [26 ; 42]	7	29	370
4	97	14,7 %	39 [29 ; 53]	8	35	508
5 et plus	58	6,1 %	46 [37 ; 58]	8	42	262
Présence de fumeur à l'intérieur						
Au moins un fumeur à l'intérieur	134	30,7 %	35 [29 ; 44]	7	32	370
Aucun fumeur à l'intérieur	338	69,3 %	37 [33 ; 42]	6	33	1 549
Type de plancher						
Plancher en bois	47	11,4 %	28 [18 ; 44]	6	23	603
Plancher en béton ou similaire	421	87,5 %	38 [34 ; 42]	6	34	1 549
Manquant	4	1,1 %	†	†	†	†
Cave communiquant avec le logement						
Oui	82	18,5 %	45 [37 ; 55]	7	42	1 549
Non	390	81,5 %	35 [31 ; 40]	6	30	603
Garage communiquant avec le logement						
Oui	136	24,0 %	46 [39 ; 54]	7	40	508
Non	334	75,8 %	34 [30 ; 39]	6	31	1 549
Manquant	2	0,2 %	†	†	†	†
Type de chauffage						
Aucun	30	6,1 %	64 [42 ; 98]	10	57	387
Central collectif	67	20,1 %	18 [16 ; 21]	6	17	100
Central individuel	239	47,7 %	49 [42 ; 56]	7	43	1 549
Électrique	127	25,0 %	33 [27 ; 40]	6	32	508
Urbain	9	1,1 %	26 [19 ; 34]	8	28	69
Présence d'un système de climatisation						
Oui	14	3,6 %	28 [22 ; 34]	7	25	61
Non	453	95,5 %	37 [33 ; 42]	6	33	1 549
Manquant	5	0,9 %	†	†	†	†
Présence d'un système de ventilation						
Ventilation mécanique	227	42,5 %	37 [31 ; 43]	7	32	1 549
Ventilation naturelle	152	38,2 %	32 [26 ; 39]	6	29	603
Aucun dispositif particulier	93	19,3 %	48 [39 ; 59]	6	46	508
Type de système de ventilation						
Double flux	4	1,4 %	27 [16 ; 47]	17	19	118
Simple flux	176	33,5 %	38 [31 ; 46]	7	32	1 549
Autre système	45	7,1 %	33 [25 ; 45]	7	32	326
Aucun système ou ventil. naturelle	245	57,5 %	37 [32 ; 43]	6	33	603
Manquant	2	0,5 %	†	†	†	†

Variabiles	Fréquence	Pourcentage pondéré	Moyenne géométrique [IC _{95%}]*	Min	Médiane	Max
Fonctionnement de la ventilation						
Tous les jours	61	10,3 %	55 [37 ; 81]	7	47	460
Quelques jours de la semaine	11	2,3 %	46 [26 ; 79]	10	42	326
Moins d'un jour par semaine	5	0,6 %	51 [29 ; 90]	21	31	125
Jamais	11	2,1 %	45 [35 ; 57]	15	46	115
Manquant	6	1,8 %	†	†	†	†
Sans-objet	378	82,9 %	†	†	†	†
Temps d'aération du séjour						
Rarement ou jamais	100	20,2 %	48 [41 ; 56]	8	42	1 549
Moins d'une demi-heure par jour	141	26,1 %	38 [32 ; 45]	6	31	508
Plus d'une demi-heure par jour	230	53,2 %	33 [28 ; 39]	6	30	460
Manquant	1	0,4 %	†	†	†	†
Présence d'une cheminée						
Oui	194	33,1 %	56 [47 ; 66]	7	50	1 549
Non	278	66,9 %	30 [26 ; 34]	6	26	460
Saison de la mesure						
Hiver	136	27,2 %	50 [41 ; 61]	6	46	603
Printemps	123	29,4 %	34 [28 ; 41]	7	31	1 549
Été	92	21,3 %	34 [25 ; 48]	7	31	460
Automne	121	22,1 %	30 [25 ; 35]	6	26	508
Géologie						
Magmatique (granitique)	27	5,0 %	106 [56 ; 200]	11	115	1 549
Magmatique (non granitique)	13	2,2 %	66 [43 ; 101]	19	54	300
Métamorphique	22	3,8 %	78 [42 ; 145]	12	114	421
Sédimentaire	410	89,0 %	33 [30 ; 37]	6	30	508

* Données pondérées, non corrigées de l'effet de saison

† Non calculé

Afin de sélectionner les variables à inclure dans le modèle de l'analyse multivariée, une matrice des corrélations des variables quantitatives et une ACM des variables qualitatives ont été réalisées.

D'après la matrice des corrélations, la concentration en radon n'était corrélée avec aucune des caractéristiques du logement considérée individuellement (annexe 2). Des corrélations significatives étaient néanmoins observées entre certaines des variables quantitatives : la température moyenne dans la chambre était significativement corrélée à celle dans le séjour ($r=0,63$), le taux d'humidité dans la chambre à celui dans le séjour ($r=0,76$), et le taux de joint aux fenêtres à celui du taux de double-vitrage ($r=0,68$). La température moyenne dans le séjour, le taux d'humidité relative dans le séjour et le taux de double-vitrage ont ainsi été écartés de l'analyse multivariée.

D'après l'ACM, les caractéristiques des logements pour lesquelles un niveau de concentration élevé en radon était observé, étaient regroupées à droite de l'axe principal (annexe 3). Il s'agissait des caractéristiques suivantes : « Présence d'une cave communiquant avec le logement », « Présence d'une cheminée », « Maison individuelle ». Les caractéristiques pour lesquelles un niveau de concentration en radon plus faible était observé, telles que « Chauffage central collectif », « Logement situé au 4^e étage et plus », « Logement collectif », étaient regroupées à gauche de l'axe principal.

La modalité « maison individuelle » était proche des modalités « rez-de-chaussée » et la modalité « logement collectif » proche des modalités « 2^e et 3^e étages » et « 4^e étage et plus ». Le type de logement a ainsi été écarté de l'analyse multivariée au profit de l'étage. De même, la variable relative au type de système de ventilation a été privilégiée par rapport à la variable présence d'un système de ventilation, moins informative. En effet, les modalités « simple flux », « double flux » ou « autres systèmes » étaient regroupées dans la modalité « système de ventilation mécanique ». Au final, l'ACM à deux dimensions permettait de représenter 14,6 % de la variance totale.

Le tableau 2 présente l'ensemble des facteurs inclus dans le modèle de régression linéaire généralisé final, leur coefficient de régression, leur IC_{95%} et la significativité de chaque variable. Le taux de survitrage et le taux de doubles-fenêtres ont été écartés *a posteriori* du modèle final de régression car ces variables étaient significativement liées à plusieurs autres variables d'après la matrice des covariances des estimateurs issus du premier modèle.

Le modèle final expliquait 40 % de la variabilité globale des concentrations en radon à l'intérieur des logements.

D'après ce modèle, les facteurs associés significativement à la concentration intérieure en radon étaient la géologie du sol sous-jacent au logement, l'étage du logement, le matériau de construction des murs, le type de chauffage, la présence d'un système de climatisation et celle d'une cheminée.

La concentration en radon augmentait de manière significative au sein des habitations dont les murs étaient en granit ($\beta=1,44$), en bois ($\beta=0,84$) ou en pierre ($\beta=0,37$) par rapport aux logements dont les murs étaient construits en béton. Les logements construits sur des sols de nature magmatique non granitique ou métamorphique présentaient une concentration en radon significativement plus élevée que ceux situés dans les régions sédimentaires (respectivement $\beta=0,70$ et $\beta=0,69$). En revanche, la concentration en radon n'était pas significativement plus élevée dans les logements situés sur un terrain granitique. La présence d'une cheminée était associée positivement à la concentration intérieure en radon ($\beta=0,19$).

La concentration en radon domestique diminuait de façon significative avec l'étage, avec un β de $-0,40$ pour les logements situés aux 2^e ou 3^e étages par rapport aux logements situés en rez-de-chaussée. Le niveau de radon était significativement moins élevé dans les logements dont le système de chauffage était central collectif ($\beta=-0,75$), électrique ($\beta=-0,56$) ou urbain ($\beta=-0,64$) par rapport aux logements ne disposant pas de système de chauffage. Enfin, les résidences possédant un système de climatisation avaient des concentrations en radon significativement plus faibles que celles qui n'en étaient pas équipées ($\beta=-0,23$).

Le niveau de radon domestique n'était pas associé de façon significative aux autres caractéristiques des logements incluses dans le modèle multivarié.

Tableau 2. Déterminants des concentrations de radon domestique selon les caractéristiques des résidences principales et la saison en France métropolitaine (campagne nationale logements de l'OQAI ; 2003-2005, données pondérées)

Déterminants	β^*	IC _{95%}	p †
Période de construction (versus Après 1982)			
Avant 1948	-0,07	[-0,35 ; 0,20]	0,386
Entre 1949 et 1967	0,12	[-0,20 ; 0,45]	
Entre 1968 et 1981	0,01	[-0,23 ; 0,25]	
Étage (versus Rez-de-chaussée)			
1 ^{er} étage	-0,10	[-0,32 ; 0,12]	0,010
2 ^e et 3 ^e étages	-0,40	[-0,72 ; -0,08]	
4 ^e étage et plus	-0,23	[-0,53 ; -0,02]	
Matériaux de construction des murs (versus Béton)			
Bois	0,84	[0,33 ; 1,34]	0,001
Brique	0,02	[-0,27 ; 0,30]	
Parpaing	0,03	[-0,16 ; 0,23]	
Granit	1,44	[0,60 ; 2,28]	
Pierre	0,37	[0,05 ; 0,69]	
Autre	0,23	[-0,09 ; 0,55]	
Densité d'occupation du logement			
<0,026 hab.m ⁻²	-0,56	[-1,09 ; -0,03]	0,083
>0,026 hab.m ⁻²	-0,56	[-1,23 ; 0,11]	
Présence de fumeur à l'intérieur (versus Au moins un)			
Aucun fumeur à l'intérieur	-0,14	[-0,28 ; 0,01]	0,093
Cave communiquant avec le logement (versus Non)			
Oui	-0,05	[-0,26 ; 0,15]	0,595
Garage communiquant avec le logement (versus Non)			
Oui	0,06	[-0,16 ; 0,29]	0,522
Type de chauffage (versus Aucun)			
Central collectif	-0,75	[-1,22 ; -0,28]	0,001
Central individuel	-0,18	[-0,59 ; 0,22]	
Électrique	-0,56	[-0,99 ; -0,13]	
Urbain	-0,64	[-1,22 ; -0,06]	
Présence d'un système de climatisation (versus Non)			
Oui	-0,23	[-0,66 ; -0,13]	0,043
Type de système de ventilation (versus Aucun ou ventilation naturelle)			
Double flux	-0,03	[-0,49 ; 0,44]	0,247
Simple flux	0,14	[-0,09 ; 0,37]	
Autre système	-0,16	[-0,37 ; 0,05]	
Temps d'aération du séjour (versus Rarement ou Jamais)			
moins d'une demi-heure par jour	-0,09	[-0,33 ; 0,16]	0,439
plus d'une demi-heure par jour	-0,12	[-0,37 ; 0,14]	
Présence d'une cheminée (versus Non)			
Oui	0,19	[0,00 ; 0,39]	0,030
Taux de renouvellement d'air			
<0,687 vol.h ⁻¹	-0,62	[-1,31 ; 0,06]	0,100
>0,687 vol.h ⁻¹	-0,63	[-1,81 ; 0,56]	
Taux de simple vitrage			
<0,377	-0,08	[-0,56 ; 0,40]	0,908
>0,377	0,03	[-0,21 ; 0,27]	
Taux de joint aux fenêtres			
<0,659	0,21	[-0,28 ; 0,71]	0,630
>0,659	-0,04	[-0,44 ; 0,36]	

Déterminants	β *	IC _{95%}	p †
Humidité relative dans la chambre			
<48,5%	-0,29	[-1,29 ; 0,71]	0,578
>48,5%	-0,21	[-0,75 ; 0,33]	
Température dans la chambre			
<20,9 °C	0,69	[-0,53 ; 1,91]	0,089
>20,9 °C	-0,36	[-0,98 ; 0,26]	
Saison (versus Été)			
Hiver	0,17	[-0,18 ; 0,51]	0,085
Printemps	-0,07	[-0,34 ; 0,20]	
Automne	-0,11	[-0,39 ; 0,18]	
Géologie (versus Sédimentaire)			
Magmatique (granitique)	0,43	[-0,31 ; 1,18]	0,001
Magmatique (non granitique)	0,70	[0,45 ; 0,94]	
Métamorphique	0,69	[0,19 ; 1,18]	

* Modèle prenant en compte le facteur de pondération

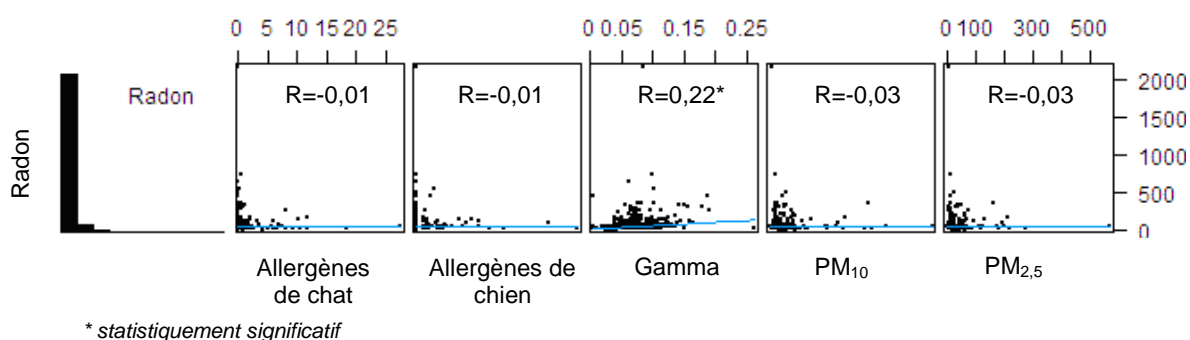
† Significativité résultant du modèle de régression linéaire généralisée construit avec ou sans la variable considérée

3.3 Corrélations entre la concentration en radon et les autres polluants

L'analyse des corrélations entre le radon et les autres polluants a été réalisée en fonction de la pièce où la mesure a été effectuée. La corrélation entre le radon et les polluants mesurés dans la chambre n'était pas interprétable au regard de la représentation de la concentration en radon mesurée au centre de l'ACP.

La figure 2 présente la matrice des corrélations des polluants mesurés dans le séjour des résidences principales. La concentration en radon était significativement corrélée à la mesure du débit de dose de rayonnement gamma, avec un coefficient de corrélation linéaire de 0,22. Elle n'était par ailleurs corrélée à aucun autre polluant.

Figure 2. Matrice des corrélations entre le radon et les autres polluants mesurés dans les séjours des résidences principales de France métropolitaine (campagne nationale logements de l'OQAI ; 2003-2005, données pondérées)



4. Discussion

Cette étude des déterminants de la concentration en radon domestique en France métropolitaine continentale étudie s'inscrit dans le cadre de l'exploitation par l'InVS des données issues de la campagne nationale « Logements » conduite par l'OQAI entre 2003 et 2005. Cette campagne constitue la première référence disponible sur la qualité de l'air intérieur du parc de logements en France.

Dans notre étude, la concentration moyenne arithmétique en radon corrigée de l'effet saison était de 61 Bq.m^{-3} [IC_{95%} : 50 ; 71]. Ce résultat est cohérent avec celui de la campagne nationale de mesure de la concentration du radon domestique réalisée par l'IRSN et pour laquelle la concentration moyenne arithmétique dans les logements français était de 63 Bq.m^{-3} [12]. L'IRSN a conduit cette campagne nationale entre 1982 et 2002, soit une période antérieure à la campagne de l'OQAI et a permis d'enregistrer plus de 12 000 mesures de radon domestique. Ces résultats montrent la stabilité dans le temps des concentrations en radon dans l'habitat. Par ailleurs, la concentration moyenne en radon domestique mesurée en France est similaire à celle observée en Allemagne (76 Bq.m^{-3}) et supérieure à celle de la Grèce (38 Bq.m^{-3}) ou du Royaume-Uni (22 Bq.m^{-3}) [15;22;32].

Dans notre étude, les mesures de radon ont été réalisées de manière homogène pour l'ensemble des habitations à l'aide de dosimètres Kodalpha qui présentent un dispositif de mesure intégré et qui sont utilisés pour la réalisation de dépistage du radon selon la norme Afnor NF M60-771. Ces dosimètres sont classiquement utilisés pour ce type de mesures dans les études similaires à la nôtre. Cependant la mesure de la concentration en radon dépend de la sensibilité du film (lot, traitement, comptage) et du bruit de fond. Les erreurs de mesures sont directement liées au nombre de traces de chaque film et aux erreurs expérimentales. L'erreur est de 21 à 26 % pour des mesures dont la concentration en radon est de l'ordre de 50 Bq.m^{-3} . Elle passe de 7 à 9 % pour des mesures de l'ordre de 400 Bq.m^{-3} [28]. Or, la majorité des concentrations mesurées dans notre étude était inférieure à 400 Bq.m^{-3} . Par conséquent, il existe une incertitude dans l'estimation des concentrations de radon dont il faut tenir compte dans l'interprétation de nos résultats, malgré la mise en place d'un protocole de mesure standardisé. Par ailleurs, le facteur saisonnier a été pris en compte dans notre analyse car il a été démontré que les concentrations en radon sont plus élevées en hiver qu'en été [29]. Le facteur de correction sur la saison a permis de standardiser l'ensemble des mesures de la concentration en radon sur l'année entière, indépendamment du mois auquel la mesure a été réalisée et de rendre comparable les mesures avec celles des études réalisées précédemment.

Au regard du pouvoir cancérogène reconnu du radon et afin de réduire les risques pour les populations exposées, plusieurs pays ont mis en œuvre une politique de gestion des risques liés au radon dans l'habitat basée sur des seuils d'intervention. Les organismes internationaux tels que l'Organisation mondiale de la santé (OMS) ou la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) précisent que la concentration en radon dans l'habitat ne doit pas dépasser 300 Bq.m^{-3} [9;33]. De plus, l'OMS recommande une concentration de référence de 100 Bq.m^{-3} [33]. En France, il n'existe pas de seuil réglementaire dans l'habitat pour le radon. En revanche, il existe des niveaux d'action pour les établissements recevant du public (ERP). En dessous de 400 Bq.m^{-3} , aucune action n'est à entreprendre. Entre 400 et $1\,000 \text{ Bq.m}^{-3}$, il est souhaitable d'entreprendre des actions de remédiation afin de réduire l'exposition au radon et au-delà de $1\,000 \text{ Bq.m}^{-3}$, des actions correctrices d'envergure doivent être impérativement conduites. En 2010, le Haut conseil de la Santé publique a recommandé pour l'habitat existant et les lieux ouverts au public que : « Le niveau d'action de 300 Bq.m^{-3} devrait être considéré comme une étape dans la stratégie de gestion du radon en France, avec un objectif à long terme d'abaisser ce niveau d'action à 100 Bq.m^{-3} » [34].

Dans la perspective d'un élargissement de la politique de gestion actuelle vers l'habitat existant et d'un abaissement des niveaux d'action à 300 Bq.m^{-3} , près de 500 000 résidences principales françaises présenteraient, d'après notre analyse, un niveau de radon domestique au-dessus du seuil d'intervention, soit 2 % du parc de logements français. Avec un niveau d'action à 100 Bq.m^{-3} , plus de 3,5 millions de résidences principales françaises seraient concernées par des travaux de remédiation, soit près de 15 % du parc de logements de France métropolitaine continentale. Cependant il faut rester prudent sur ces estimations basées sur un échantillon qui, bien que représentatif des

résidences principales en France métropolitaine continentale, est de taille relativement faible (n=472 logements).

Les principaux déterminants mis en évidence dans cette étude et associés significativement à la concentration intérieure en radon étaient la nature géologique du sol, la présence d'un système de chauffage ou de climatisation, l'étage, la présence d'une cheminée et le matériau de construction du logement. Il s'agit de la première étude française incluant autant de caractéristiques des logements, basée sur un échantillon représentatif des résidences principales de France métropolitaine continentale.

Ainsi notre étude a permis de mettre en évidence plusieurs déterminants de la concentration de radon domestique, classiquement retrouvés dans la littérature. Le type de roche sous-jacent au logement était significativement associé à la concentration intérieure en radon. Les logements situés sur un sol de nature métamorphique ou volcanique avaient des concentrations de radon plus élevées que ceux situés sur un terrain sédimentaire. De nombreuses études ont mis en évidence l'influence prédominante des facteurs géologiques et notamment du type de roche sous-jacent au logement [13;15;17-19;22;35]. Par ailleurs, il est clairement établi que les niveaux de radon varient selon la capacité de la roche à produire et transporter le radon à la surface du sol [21;36;37]. Ainsi les roches granitiques favorisent l'augmentation des niveaux du radon à l'intérieur des habitations par rapport aux roches sédimentaires. Néanmoins, dans notre étude, les roches de nature granitique n'apparaissaient pas comme déterminants significatifs de la concentration de radon à l'intérieur des logements. La nature de ces roches a été définie à partir d'une variable géologique issue du BRGM et n'était sans doute pas assez précise pour caractériser la capacité du sol à produire et transporter le radon à la surface. De plus, il est à noter que, dans notre étude, tous les logements avec des murs en granit étaient situés sur un sol de nature granitique. Lorsque la variable « matériaux de construction » était retirée du modèle multivarié, le type de roche granitique magmatique était associé significativement à une augmentation du niveau de radon à l'intérieur des logements. Ainsi la géologie du sol sous-jacent au logement et les matériaux de construction n'étaient pas des variables indépendantes dans notre modèle. Cela peut avoir contribué à minimiser l'effet du sol granitique par rapport à l'impact des matériaux de construction dans le modèle de régression.

Le matériau de construction principal du logement était en effet un déterminant significatif de la concentration en radon dans notre analyse. Les résidences principales dont les murs étaient en granit, ou en pierre présentaient des concentrations en radon significativement plus élevées que celles dont les murs étaient en béton. Ces résultats sont cohérents avec ceux de la littérature [13;15;20;38]. En effet, la diffusion du radon à travers les matériaux de construction s'effectue selon le gradient de concentration et le degré de porosité des murs [21]. Une augmentation significative de la concentration en radon domestique dans les logements ayant des murs en bois a été retrouvée dans notre étude. En revanche, à notre connaissance, cette association n'a jamais été mise en évidence dans la littérature. L'étude de Gunby, *et al.* a, quant à elle, mis en évidence une diminution de 57 % du niveau de radon dans les logements britanniques dont les murs étaient en bois [15]. Une analyse détaillée des logements présentant des murs en bois a été réalisée et n'a pas permis d'expliquer cette association. Il pourrait s'agir d'un facteur de confusion car les effectifs de ces logements dans la campagne OQAI étaient faibles (n=8).

Dans notre analyse, la concentration en radon domestique était associée significativement à l'étage auquel se situait le logement. Les concentrations en radon les plus élevées étaient observées dans les logements situés au rez-de-chaussée ou au premier étage. Ce résultat est cohérent avec ce qui est observé dans la littérature [13;15;17;18;20;22;39]. Le radon étant principalement émis à partir du sol, l'atténuation des concentrations avec les étages est due à des effets de dilution du gaz, et non pas, à sa tendance à s'accumuler près du sol du fait de sa densité, contrairement aux idées reçues. Les logements situés en étage sont de ce fait moins exposés. En 2003, une étude grecque a émis l'hypothèse que dans le cas des logements situés au-delà du premier étage, la source du radon correspond à la diffusion du radon à travers les matériaux de construction plutôt qu'à la diffusion du radon à travers le sol [22].

Notre étude a mis en évidence plusieurs déterminants de la concentration de radon domestique, qui ne sont pas classiquement retrouvés dans la littérature. Ainsi, la présence d'une cheminée favorisait l'augmentation de la concentration en radon dans les logements de notre étude. Ce résultat a déjà été mis en évidence dans une seule étude conduite dans une province du Québec [17]. L'une des explications possibles à cette observation est que l'augmentation de la température liée à l'utilisation de la cheminée entraîne une accentuation du tirage thermique et donc de la dépression du bâtiment, ce qui favorise l'entrée du radon dans le logement. Il est à noter que la notion d'utilisation de la cheminée n'était pas renseignée dans notre étude. Cependant la présence d'un système de chauffage apparaissait comme un facteur protecteur significatif de la concentration en radon dans les logements de notre étude. Ce résultat a été également observé dans d'autres études et notamment l'étude québécoise évoquée ci-dessus [17;24]. Les résultats sur la présence d'une cheminée et sur celle d'un système de chauffage semblent contradictoires. Ils pourraient être expliqués par le fait que la cheminée favorise plus fortement le tirage thermique qui facilite l'entrée de radon au sein du logement alors que le chauffage contribue à augmenter la température dans le logement sans créer d'appel d'air.

Dans notre analyse, les logements disposant d'un système de climatisation présentaient des concentrations en radon significativement moins élevées que ceux qui n'en possédaient pas. À notre connaissance, il s'agit de la première étude à mettre en évidence *in situ* le système de climatisation comme déterminant significatif des niveaux de radon dans les logements. Néanmoins, plusieurs études expérimentales avaient déjà suggéré l'effet réducteur du système de climatisation sur la concentration intérieure en radon [40]. En effet, les systèmes de climatisation, selon leur mode de fonctionnement, peuvent participer au renouvellement de l'air intérieur en apportant de l'air neuf et en diluant la présence de radon.

Plusieurs déterminants connus de l'exposition au radon domestique ne sont pas apparus comme significatifs dans l'analyse multivariée, tels que la présence d'une cave ou d'un garage attenant au logement, d'un système de ventilation, les comportements d'aération et la période de construction du logement. Ceci pourrait s'expliquer par le manque de puissance statistique de notre modèle de régression du fait de la taille de notre échantillon (n=472). De même, la saison n'était pas un déterminant statistiquement significatif de la concentration brute en radon non corrigée de l'effet saisonnier, alors que les logements enquêtés en été ou en automne semblaient présenter des concentrations inférieures à ceux enquêtés en hiver ou au printemps.

Il reste une grande partie de la concentration en radon qui peut être expliquée par d'autres déterminants n'ayant pas été pris en compte dans notre étude, tels que le gradient de pression à l'intérieur du logement ou une caractérisation plus fine de la géologie du sol sous-jacent qui participent également à la modification des concentrations en radon. Néanmoins, notre étude a permis d'estimer près de 40 % de la variabilité des niveaux de radon observés, alors que dans l'étude britannique réalisée sur plus de 2 000 logements, le modèle n'en expliquait que 22 % [15]. Par ailleurs, les Français passent en moyenne 67 % de leur temps dans leur logement [25]. Les déterminants mis en évidence dans cette analyse ne sont donc pas ceux de l'exposition totale individuelle au radon, dont la détermination nécessiterait un budget espace-temps plus complet, sur l'ensemble des lieux fréquentés.

Une corrélation significative a été observée entre la concentration en radon et le débit de dose de rayonnement gamma mesurés dans le séjour. Cette corrélation a déjà été mise en évidence en 2009 sur ce même échantillon de logements mais sur des données non pondérées sur la présence d'une mesure de radon ($r=0,43$) ainsi qu'à partir des données des campagnes de mesure de radon dans l'habitat [8;41]. Les rayons gamma sont principalement d'origine tellurique et leur débit de dose varie suivant la nature de la roche sous-jacente. Ils sont émis lors de la désintégration d'atomes radioactifs, notamment lors de la désintégration de radon 222 en radon 220. Il est donc cohérent de constater une corrélation significative entre le débit de dose de rayonnement gamma et la concentration en radon. En 2001, une étude finlandaise a pu mettre en évidence une corrélation significative entre la concentration en radon et le débit de dose de rayonnement gamma [42]. Les auteurs n'ont en revanche pas observé d'influence significative du débit de dose de rayonnement gamma sur la concentration en radon dans leur modèle de régression du fait de l'effet prédominant du matériau de

construction et du type de logement. Une étude est actuellement menée à l'IRSN sur les corrélations spatiales entre les concentrations en radon et le débit de dose gamma tellurique.

Dans notre étude, les tests statistiques effectués, réalisés à un seuil fixé à 5 %, ont été limités afin de réduire le risque de rejeter à tort un résultat. L'essentiel de l'analyse a été descriptif, et seul le modèle de régression a fait intervenir des tests statistiques. En revanche, le fait de ne travailler que sur la moyenne des niveaux de radon entre la chambre et le séjour a entraîné une perte de variabilité des concentrations.

5. Conclusion et perspectives

Les logements représentent un lieu d'exposition majeur au radon compte tenu du temps passé à l'intérieur par leurs habitants. Cette étude permet d'améliorer les connaissances actuelles vis-à-vis de l'exposition au radon dans les logements et des déterminants des concentrations intérieures. Elle constitue, avec l'analyse réalisée par l'IRSN à partir des campagnes de mesure de radon et du potentiel radon géogénique, une première référence disponible en France métropolitaine en la matière.

Parmi l'ensemble des déterminants des niveaux de radon dans l'habitat, la géologie du sol permet d'expliquer une grande partie de la variabilité de la concentration en radon. Or dans notre étude, la définition de la géologie du sol n'était pas assez précise pour caractériser sa capacité à produire et transporter le radon à la surface. Dans le but d'une meilleure caractérisation, l'IRSN a réalisé en 2008-2010 une cartographie du potentiel radon des formations géologiques à l'échelle de la commune [14]. Cette nouvelle cartographie prend en compte le potentiel de production de radon des formations géologiques ainsi que la présence de cofacteurs facilitant la circulation du radon dans le sol. Dans ce contexte, une analyse complémentaire pourrait être envisagée en prenant en compte le « potentiel radon » défini par l'IRSN.

De plus, bien qu'influencée de façon majeure par la géologie du sol, la concentration en radon dans les logements est également significativement affectée par certaines caractéristiques du logement. Notamment, la présence d'un système de climatisation apparaît pour la première fois comme favorisant la dilution du radon au sein des logements. La prise en compte de ces caractéristiques peut permettre de mieux apprécier le « risque radon » pour les occupants du logement, particulièrement dans les départements identifiés comme prioritaires. Enfin, l'absence de corrélation entre le radon et les autres polluants mesurés démontre l'utilité d'une stratégie de prévention spécifique au radon.

Références bibliographiques

- [1] Rannou A, Aubert B, Scanff P. Exposition de la population française aux rayonnements ionisants. Fontenay-aux-Roses: Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire; 2006.
- [2] Darby S, Hill D, Auvinen A, Barros-Dios JM, Baysson H, Bochicchio F, *et al.* Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ* 2005;330(7485):223.
- [3] Krewski D, Lubin JH, Zielinski JM, Alavanja M, Catalan VS, Field RW, *et al.* Residential radon and risk of lung cancer: A combined analysis of 7 North American case-control studies. *Epidemiology* 2005;16(2):137-45.
- [4] International agency for research on cancer (IARC). IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans man-made fibres and radon. Vol. 43. 1988. 300 p.
- [5] Catelinois O, Rogel A, Laurier D, Billon S, Hemon D, Verger P, *et al.* Lung cancer attributable to indoor radon exposure in France: Impact of the risk models and uncertainty analysis. *Environ Health Perspect* 2006;114(9):1361-6.
- [6] Richardson RB, Eatough JP, Henshaw DL. Dose to red bone marrow from natural radon and thoron exposure. *Br J Radiol* 1991;64(763):608-24.
- [7] 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.
- [8] Evrard AS, Hémon D, Billon S, Laurier D, Jouglu E, Tirmarche M, *et al.* Childhood leukemia incidence and exposure to indoor radon, terrestrial and cosmic gamma radiation. *Health Phys* 2006;90(6):569-79.
- [9] ICRP. Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon. ICRP Publication 115, Ann. ICRP 40(1). 2010.
- [10] Laurier D, Valenty M, Tirmarche M. Radon exposure and the risk of leukemia: A review of epidemiological studies. *Health Phys* 2001;81(3):272-88.
- [11] Lubin JH, Linet MS, Boice J, Buckley J, Conrath SM, Hatch EE, *et al.* Case-control study of childhood acute lymphoblastic leukemia and residential radon exposure. *J Natl Cancer Inst* 1998;90(4):294-300.
- [12] Billon S, Morin A, Caer S, Baysson H, Gambard JP, Backe JC, *et al.* French population exposure to radon, terrestrial gamma and cosmic rays. *Radiation Protection Dosimetry* 2005;113(3):314-20.
- [13] Demoury C, Ielsch G, Hemon D, Laurent O, Laurier D, Clavel J, *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;126C:216-25.
- [14] Ielsch G, Cushing ME, Combes P, Cuney M. Mapping of the geogenic radon potential in France to improve radon risk management: methodology and first application to region Bourgogne. *J Environ Radioact* 2010;101(10):813-20.
- [15] Gunby JA, Darby SC, Miles JCH, Green BMR, Cox DR. Factors affecting indoor radon concentrations in the United Kingdom. *Health Phys* 1993;64(1):2-12.
- [16] Ielsch G, Cuney M. Cartographie prédictive du potentiel d'exhalation du radon-222 à la surface des sols : exemple d'application dans le Massif Armoricain. *Environnement, Risques et Santé* 2004;3 (1) janvier-février

- [17] Levesque B, Gauvin D, McGregor RG, Martel R, Gingras S, Dontigny A, *et al.* Radon in residences: Influences of geological and housing characteristics. *Health Phys* 1997;72(6):907-14.
- [18] Sundal AV, Henriksen H, Soldal O, Strand T. The influence of geological factors on indoor radon concentrations in Norway. *Sci Total Environ* 2004;328(1-3):41-53.
- [19] Zunic ZS, Yarmoshenko IV, Birovljev A, Bochicchio F, Quarto M, Obryk B, *et al.* Radon survey in the high natural radiation region of Niska Banja, Serbia. *J Environ Radioact* 2007;92(3):165-74.
- [20] Barros-Dios JM, Ruano-Ravina A, Gastelu-Iturri J, Figueiras A. Factors underlying residential radon concentration: results from Galicia, Spain. *Environ Res* 2007;103(2):185-90.
- [21] Collignan B. Le radon dans les bâtiments : guide pour la remédiation dans les constructions existantes et la prévention dans les constructions neuves. CSTB. 2008.
- [22] Papaefthymiou H, Mavroudis A, Kritidis P. Indoor radon levels and influencing factors in houses of Patras, Greece. *J Environ Radioact* 2003;66(3):247-60.
- [23] Miles JC, Appleton JD. Mapping variation in radon potential both between and within geological units. *J Radiol Prot* 2005;25(3):257-76.
- [24] Mose DG, Mushrush GW, Slone JE. Environmental factors governing indoor radon. *Environ Sci Eng Toxic Hazard Subst Control* 1996;31(3):553-77.
- [25] Zeghnoun A, Dor F. Description du budget espace-temps et estimation de l'exposition de la population française dans son logement . Saint-Maurice: Institut de veille sanitaire; 2008. 40 p. [consulté le 08/08/2011]. Disponible à partir de l'URL : http://opac.invs.sante.fr/doc_num.php?explnum_id=158
- [26] Kirchner S, Arenes J, Cochet C, Derbez M, Duboudin C, Elias P, *et al.* Campagne nationale Logements. État de la qualité de l'air dans les logements français. Champs-sur-Marne: CSTB, Observatoire de la qualité de l'air intérieur; 2006. 165 p. [consulté le 19/07/2011]. Disponible à partir de l'URL : http://www.air-interieur.org/userdata/documents/Document_133.pdf
- [27] Sautory O. La macro Calmar : redressement d'un échantillon par calage sur marges. Rep. F9310, Insee. 1993.
- [28] Laboratoire Dosirad. Dosimètre radon Kodalpha [Internet]. France Laboratoire Dosirad [consulté le 02/08/2011]. Disponible à partir de l'URL : <http://dosirad.pagespro-orange.fr/radon.htm>
- [29] Baysson H, Billon S, Laurier D, Rogel A, Tirmarche M. Seasonal correction factors for estimating radon exposure in dwellings in France. *Radiat Prot Dosimetry* 2003;104(3):245-52.
- [30] Caron N. La correction de la non-réponse par repondération et par imputation, document de travail [Internet]. 2005. [consulté le 02/10/2011]. Disponible à partir de l'URL : http://www.insee.fr/fr/publications-et-services/docs_doc_travail/m0502.pdf
- [31] Bureau de recherches géologiques et minières. Infoterre [Internet]. Orléans : Bureau de recherches géologiques et minières [mis à jour le 2010] [consulté le 02/11/2011]. Disponible à partir de l'URL : <http://infoterre.brgm.fr/viewer/MainTileForward.do>
- [32] Kreuzer M, Heinrich J, Wolke G, Schaffrath RA, Gerken M, Wellmann J, *et al.* Residential radon and risk of lung cancer in Eastern Germany. *Epidemiology* 2003;14(5):559-68.
- [33] WHO. Handbook of indoor radon - a public health perspective. 2009.
- [34] Haut Conseil de la sante publique (HCSP). Avis sur les projets de décret et d'arrêtés relatifs à la protection des personnes contre le risque lié au radon dans les bâtiments. 17/03/2010.

- [35] Gillmore GK, Phillips PS, Denman AR. The effects of geology and the impact of seasonal correction factors on indoor radon levels: A case study approach. *J Environ Radioact* 2005;84(3):469-79.
- [36] Ielsch G, Thieblemont D, Labed V, Richon P, Tymen G, Ferry C, *et al.* Radon (^{222}Rn) level variations on a regional scale: influence of the basement trace element (U, Th) geochemistry on radon exhalation rates. *J Environ Radioact* 2001;53(1):75-90.
- [37] Ielsch G, Ferry C, Tymen G, Robe MC. Study of a predictive methodology for quantification and mapping of the radon-222 exhalation rate. *J Environ Radioact* 2002;63(1):15-33.
- [38] Dupuy M, Améon R, Alcade G, Diez O. Les matériaux de construction, source secondaire de radon dans les bâtiments. Rapport IRSN-DEI/SARG/2008-008. 2008.
- [39] Jedrychowski W, Flak E, Wesolowski J, Liu KS. Relation between residential radon concentrations and housing characteristics, The Cracow Study. *Cent Eur J Public Health* 1995;3(3):158-60.
- [40] Marley F, Phillips PS. Investigation of the potential for radon mitigation by operation of mechanical systems affecting indoor air. *J Environ Radioact* 2001;54(2):205-19.
- [41] Duboudin C. Pollution inside the home: Descriptive analyses. Part I: Analysis of the statistical correlations between pollutants inside homes. *Environ Risques Technol* 2009;8(6):485-96.
- [42] Makelainen I, Arvela H, Voutilainen A. Correlations between radon concentration and indoor gamma dose rate, soil permeability and dwelling substructure and ventilation. *Sci Total Environ* 2001;272(1-3):283-9.

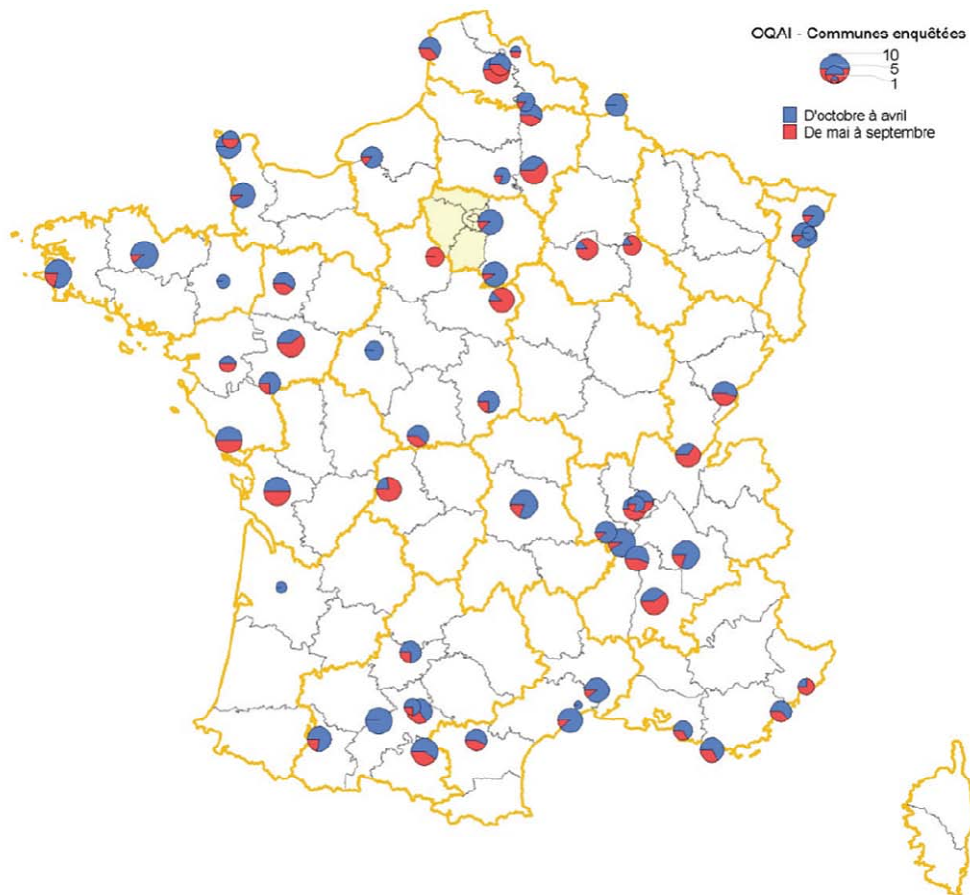
Annexes

Annexe 1. Répartition géographique des logements enquêtés lors de la campagne nationale de l'OQAI (2003-2005, n=567 logements)

Annexe 2. Matrice des corrélations des caractéristiques des résidences principales (Étude de l'OQAI ; 2003-2005, n=472 logements, données pondérées)

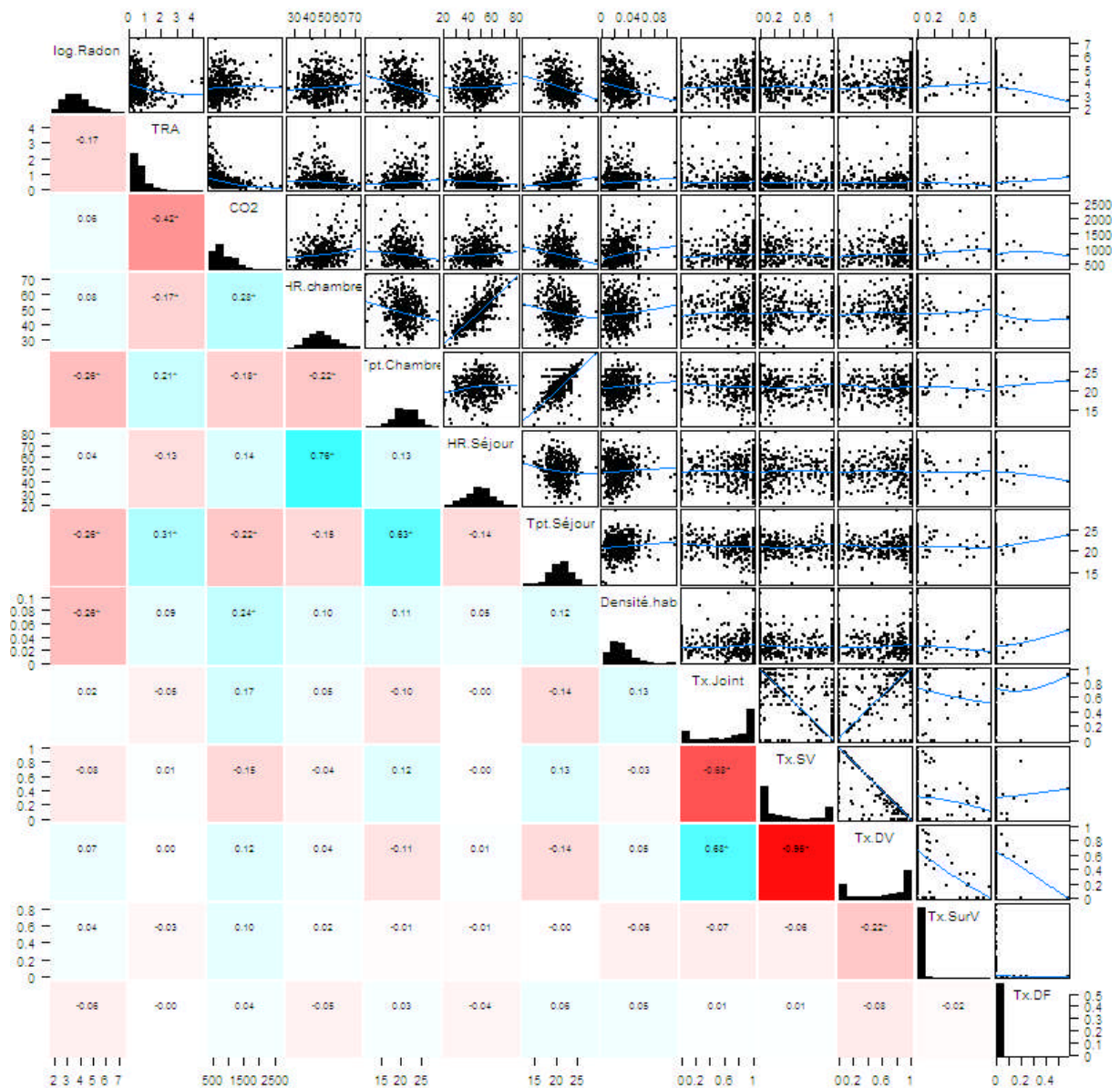
Annexe 3. Analyse des correspondances multiples des caractéristiques des résidences principales (Étude de l'OQAI ; 2003-2005, données pondérées)

Annexe 1. Répartition géographique des logements enquêtés lors de la campagne nationale de l'OQAI (2003-2005, n=567 logements)



Source : OQAI, CSTB

Annexe 2. Matrice des corrélations des caractéristiques des résidences principales (Étude de l'OQAI ; 2003-2005, n=472 logements, données pondérées)



Les niveaux de radon et leurs déterminants dans les logements de France métropolitaine continentale

Introduction : Le radon est un gaz naturel radioactif et classé cancérigène pulmonaire certain chez l'Homme. En France, le radon est la première source d'exposition aux rayonnements ionisants, avant même les expositions médicales.

Cette étude a pour objectifs de décrire les niveaux de radon dans les logements et d'étudier les déterminants des niveaux en radon domestique, sur la base d'un échantillon représentatif des logements français. Ce travail est complémentaire à celui réalisé par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) en 2011-2013 à partir des campagnes de mesures de radon dans l'habitat et de la cartographie du potentiel radon géogénique.

Matériels et méthodes : Les caractéristiques des logements et les concentrations des polluants intérieurs, dont le radon, ont été recueillies entre 2003 et 2005 pendant la campagne nationale « Logements » menée par l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI), sur un échantillon représentatif des résidences principales en France métropolitaine continentale. Un modèle de régression linéaire généralisé a été utilisé afin de déterminer les facteurs influençant les niveaux de radon mesurés à l'intérieur des logements. L'analyse a été réalisée en tenant compte du plan de sondage et du facteur saisonnier.

Résultats : La moyenne arithmétique de la concentration en radon domestique était de 61 Bq.m⁻³ [IC 95% : 50 ; 71] et la moyenne géométrique de 37 Bq.m⁻³ [IC 95% : 33 ; 41]. Les déterminants associés significativement à la concentration intérieure en radon étaient la nature géologique du sol, la présence d'un système de chauffage ou de climatisation, l'étage, la présence d'une cheminée et le matériau de construction du logement. Le modèle de régression a permis d'expliquer 40 % de la variabilité des niveaux de radon observés. Une corrélation significative a été observée entre la concentration intérieure en radon et le débit de dose intérieur de rayonnement gamma ($r=0,22$).

Conclusion : Cette étude a permis de mieux caractériser les déterminants de la concentration en radon à l'intérieur des logements en France. Les déterminants mis en évidence dans cette étude sont en accord avec ceux trouvés dans les autres études publiées récemment.

Mots clés : radon, air intérieur, déterminant, logement, France

Indoor radon and influencing factors in dwellings in continental metropolitan France

Introduction: Radon is a natural radioactive gas, classified as a lung carcinogen to humans. Radon constitutes the major contribution of the exposure of the French population to ionizing radiation, before the medical one. This study aims to evaluate the radon levels within French dwellings and their determinants based on a representative sample of the French dwellings. This work is complementary to that carried out by IRSN from measurement campaigns of indoor radon.

Materials and methods: The dwelling characteristics and indoor concentrations of pollutants, including radon, were collected between 2003 and 2005 during the campaign conducted by the "Observatoire de la qualité de l'air intérieur" of a representative sample of principal residences in mainland France. A generalized linear regression model was used to determine the factors affecting radon levels measured inside dwellings. The analysis was performed taking into account the sampling design and seasonal correction factor.

Results: The arithmetic mean of the radon concentration was of 61 Bq.m⁻³ [95% CI: 50, 71] and the geometric mean of 37 Bq.m⁻³ [95% CI: 33, 41]. Determinants significantly associated with the indoor radon levels were: the sub soil geology, the presence of a heating or air conditioning system, the floor, the presence of a fireplace and the nature of the building material. The regression model explained 40% of variability in indoor radon levels. A significant correlation was also observed between indoor radon levels and dose rate of gamma radiation ($r=0.22$).

Conclusion: This study allows a better characterisation of the determinants of indoor radon levels in France. These results are in overall concordance with findings from other studies.

Citation suggérée :

Paillard JC, Roudier C, Aubert L, Vacquier B. Les niveaux de radon et leurs déterminants dans les logements de France métropolitaine continentale. Saint-Maurice : Institut de veille sanitaire ; 2014. 24 p. Disponible à partir de l'URL : <http://www.invs.sante.fr>