



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Comptes Rendus Mécanique

www.sciencedirect.com



Concentration en radon dans une maison du Calvados

*Radon concentration in a house of Calvados*Lydia Leleyter^{a,*}, Benoit Riffault^a, Bernard Mazenc^b^a Université de Caen Basse Normandie, équipe de recherche en physico-chimie et biotechnologies (ERPCB), EA 3914, 14000 Caen, France^b Géodéris, avenue de Tsukuba, 14209 Herouville St Clair cedex, France

I N F O A R T I C L E

Historique de l'article :

Reçu le 15 décembre 2009

Accepté après révision le 13 mars 2010

Mots-clés :

Sols

Radon

Cancer

Cheminée

Ventilation par insufflation mécanique

Maison particulière

Keywords:

Soils

Radon

Cancer

Fireplace

Mechanical insufflating ventilation

Private home

R É S U M É

D'après des études récentes, il existe un lien entre le risque de cancer du poumon et l'exposition domestique au radon. Pour autant, la prise de conscience du problème en France s'est faite relativement tardivement. Nous avons choisi de mener une expérience portant sur la concentration en radon dans une maison particulière du Calvados. Il s'agit de mettre en exergue que la présence d'une cheminée dans une maison peut accélérer le transfert convectif du radon et que des aménagements intérieurs et extérieurs simples peuvent réduire de manière significative la concentration en radon à l'intérieur de cette habitation.

© 2010 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

A B S T R A C T

Recent studies indicate a link between the risk of lung cancer and residential radon exposure. However, in France, awareness of this problem was made relatively late. Accordingly this study examines the radon concentration in a private home in Calvados. Findings show that the presence of a fireplace in a house can accelerate radon convective transfer, and that simple adjustments to interior and exterior accommodation can significantly reduce radon concentrations in the home.

© 2010 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Abridged English version*Introduction*

Radon 222 is a natural radioactive gas. The proportion of radon which escapes from the ground, depends on the geology, on the pedology of the ground and on the weather conditions. If the radon released to the surface becomes trapped in an enclosed space such as a house, it can accumulate and reach levels which are detrimental to the health of the inhabitants. The objectives of this Note are to study the impact of the presence of a fireplace on the concentration in radon in the air of a house situated in a zone which is naturally rich in radon, and to assess the efficiency of some simple modifications made to the house to reduce radon concentrations.

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : lydia.reinert@unicaen.fr (L. Leleyter).

Material and methods

The measures were made by means of a dosimeter (Measure Man from Sarad GmbH), placed in 1 m of the ground in an individual house situated in the Calvados (Fig. 1). The measures were made in two different rooms: the bedroom and the dining room.

Results and discussion

Fig. 2 shows the radon concentrations the house measured in June 2008. Mean values obtained in the dining room indicate that the volume activity exceeds 1000 Bq/m^3 . Tables 1 and 2 indicate an important difference between the measurements made in the bedroom and those made in the dining room. This difference is attributed to the presence of the fireplace in the dining room which (even when not in use) accelerates the stack effect of this room, hence, convective transfer of radon in the room. Also evident in Fig. 2 is that periods of day, characterized by weak concentrations of radon, alternate with periods of night which are characterized by elevated radon concentrations. This can be also explained by the importance of the stack effect of the house which is important all the more when the outside temperature is cold (Fig. 3).

A series of modifications were made to the house to decrease convective transfer of radon. The first series of works consisted of creating areas of low aeration and natural ventilation in the subfloor (Fig. 4). The second series of modifications consisted of installing IMV (Insufflating Mechanical Ventilation), to produce light overpressure within the house. Following these modifications radon levels were monitored in the same period of the year (the end of June, the beginning of July) in 2009 and in the same conditions as those of the initial survey conducted in 2008. The efficiency of the modifications in the bedroom and dining room is evidenced by reductions in radon levels, from 194 to 25 Bq/m^3 and from 1123 to 56 Bq/m^3 within the bedroom and dining room respectively (Fig. 5). Tables 1 and 2 allow an estimation of the impact of the installation of an IMV unit in the house. Data shows that the IMV unit has a positive important impact, particularly when the outside temperatures are relatively low (in autumn, winter).

Conclusion

Results therefore show that it is important that a state of under pressure within the house is avoided. In the case of this particular house the implementation of low aerations (diameter 10 cm) and an aeration of the basement of the house allowed for a substantive decrease in the concentration of radon. Furthermore, the installation of IMV makes a significant contribution to a decrease in radon concentrations within the dwelling. Future work is required to address the possible effect of Exhaust Mechanical Ventilation to accentuate radon depression in the house and thereby encourage convective transfer of radon from basement towards the house.

1. Introduction

Le radon 222 est un gaz radioactif naturel, descendant de la famille radioactive de l'uranium 238. Le radon est lui-même radioactif et se désintègre par émission alpha en donnant naissance à des radionucléides à vie courte comme le polonium, le bismuth, pour donner finalement du plomb stable. Les proportions de radon, qui s'exhalent d'un sol, dépendent de la géologie (les régions volcaniques ou granitiques sont à haut potentiel d'exposition naturelle, alors que les régions sédimentaires sont considérées à plus faible potentiel d'exposition, mais des exceptions sont possibles [1]), de la pédologie du terrain et des conditions météorologiques. L'exhalation du radon est due dans un premier temps à la formation et à la libération du radon au sein de son milieu source (c'est l'émanation du radon), et dans un deuxième temps à sa migration depuis cette source vers la surface. Les voies de migrations microscopiques sont les pores et macropores des roches et du sol. A plus grande échelle, ce sont les failles, karsts, cavités qui vont être des drains préférentiels de migration du radon. La quantité de radon qui s'exhale en surface va dépendre de la facilité et de l'efficacité de transport du gaz à travers le sol et sous sol.

La diffusion atmosphérique conduit, en général, à une dilution rapide du radon émanant du sol. Arrivé en surface, au contact de l'atmosphère, le radon est donc dilué rapidement dans l'air à des concentrations très faibles (sauf dans certains cas : vallée encaissée, phénomènes d'inversion de température conduisant à des mouvements d'air faible). Si un bâtiment se trouve en surface, le tirage thermique dans ce bâtiment induit une légère dépression au niveau du plancher bas favorisant un flux convectif venant du sol, et pouvant être chargé en radon. Le confinement relatif du bâtiment peut permettre alors l'accumulation du radon pour atteindre des concentrations pouvant devenir élevées [2]. Ces concentrations peuvent ainsi atteindre des niveaux pouvant porter atteinte à la santé des personnes vivant dans ces lieux confinés. En effet, le radon et ses descendants à courte vie, peuvent se déposer par inhalation sur certaines cellules pulmonaires où ils finiront leurs désintégrations en cascades. De fait, le risque de cancer des poumons est directement concerné par l'inhalation du radon [1,3,4]. Même si le tabac reste la première cause de cancer du poumon, plusieurs études épidémiologiques indiquent une association positive entre le risque de cancer du poumon et l'exposition domestique au radon [1,4–9] due aux rayonnements alpha émis par le radon et ses descendants qui renforcent mutuellement leur effet nocif. On estime qu'aux Etats-Unis, 10 à 15% des cancers bronchiques résultent de l'exposition domestique au radon [1], en France cette estimation se situe entre 5 et 12% selon [9,10]. La prise de conscience du problème en France est relativement récente. Sur le plan réglementaire, en

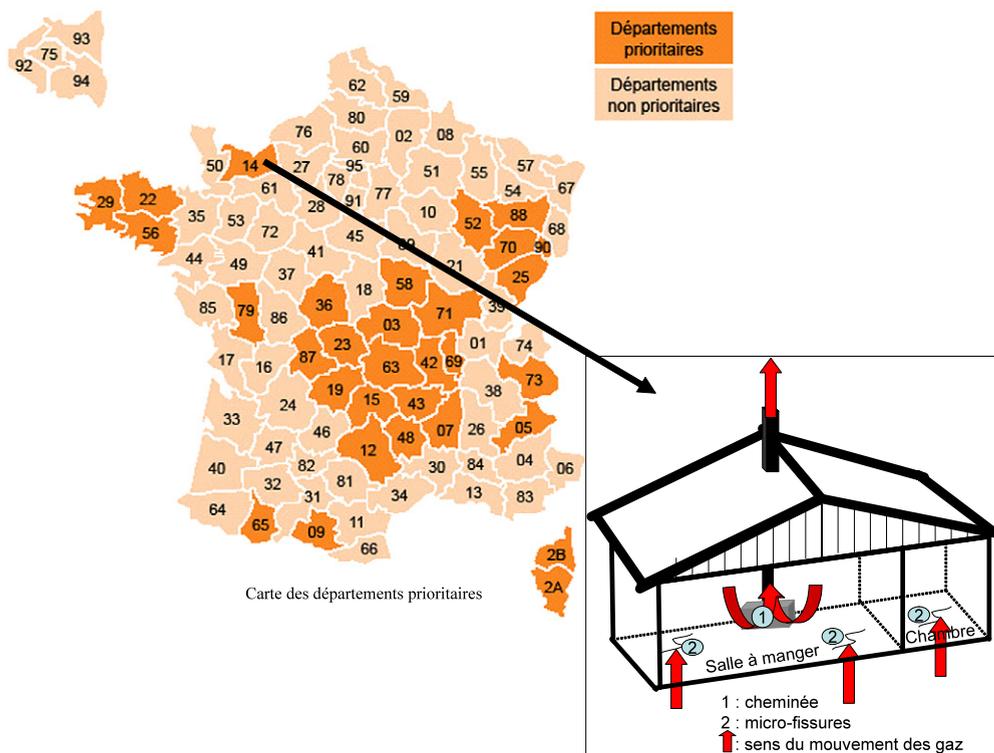


Fig. 1. Une maison du Calvados, France.

France, les pouvoirs publics estiment que l'on peut distinguer trois niveaux en termes d'exposition dans les lieux ouverts au public : en dessous de 400 Bq/m^3 , « la situation ne justifie pas d'action correctrice particulière » ; entre 400 et 1000 Bq/m^3 , « il est souhaitable d'entreprendre des actions correctrices simples » ; au-delà de 1000 Bq/m^3 , « des actions correctrices, éventuellement d'envergure, doivent être impérativement conduites à bref délai, car on aborde un niveau de risque qui peut être important » (selon l'Arrêté du 22 juillet 2004 relatif aux modalités de gestion du risque lié au radon dans les lieux ouverts au public [11]). On note cependant que les valeurs « recommandées » varient selon les pays. Par exemple, l'Agence de Protection de l'Environnement Américaine recommande des mesures de réduction de concentration pour les habitations dès les concentrations en radon supérieures à 148 Bq/m^3 [1].

Dans ce contexte, il semble nécessaire d'approfondir les études déjà publiées sur la présence du radon dans des bâtiments édifiés dans des zones géographiques riches en radon, ainsi que sur l'adaptation concrète de solutions de remédiation. Ainsi, cet article a pour objectifs d'étudier l'impact de la présence d'une cheminée, sur la concentration en radon dans l'air d'une maison particulière située sur une zone naturellement riche en radon, ainsi que de mesurer l'efficacité de quelques travaux simples effectués en vue de réduire la concentration en radon à l'intérieur de cette maison particulière.

2. Matériel et méthodes

Les mesures ont été faites à l'aide d'un dosimètre, de marque Dose Man de la société Sarad GmbH, placé à 1 m du sol dans une maison individuelle située dans le Calvados (Fig. 1), donc dans l'un des 31 départements prioritaires pour la mesure du radon (selon l'Arrêté du 22 juillet 2004 relatif aux modalités de gestion du risque lié au radon dans les lieux ouverts au public [11]). Cet appareil de poche à chambre de mesure à semi-conducteur polarisé permet d'avoir une mesure semi-quantitative en continu dont la précision est suffisante pour cette expérimentation.

A l'origine, la maison test retenue a été choisie car elle se situe dans une commune sous-minée par une ancienne exploitation souterraine de fer. Cette mine a fait l'objet d'une étude sur les échanges gazeux dans les anciens travaux souterrains de la mine [12]. Par la suite, il s'est avéré que cette maison est localisée en dehors de l'édifice minier et que les variations de concentration en radon observées sont sans relation avec les flux gazeux mesurés dans l'ancienne mine. La maison test sélectionnée pour cette étude est une maison traditionnelle de plain-pied, sans sous-sol ni vide sanitaire, construite sur du remblais. La maison présente un rez-de-chaussée (RdC) avec une surface au sol est de 90 m^2 , et des combles qui sont complètement aménagées (3 chambres, une salle d'eau dans les combles). La maison, équipée de double vitrage, est bien isolée (faible consommation d'énergie). Les aérations initiales se composent exclusivement d'une aération basse et d'une aération haute dans la cuisine (au RdC) ainsi que d'un conduit de cheminée avec insert dans la salle à manger (RdC).

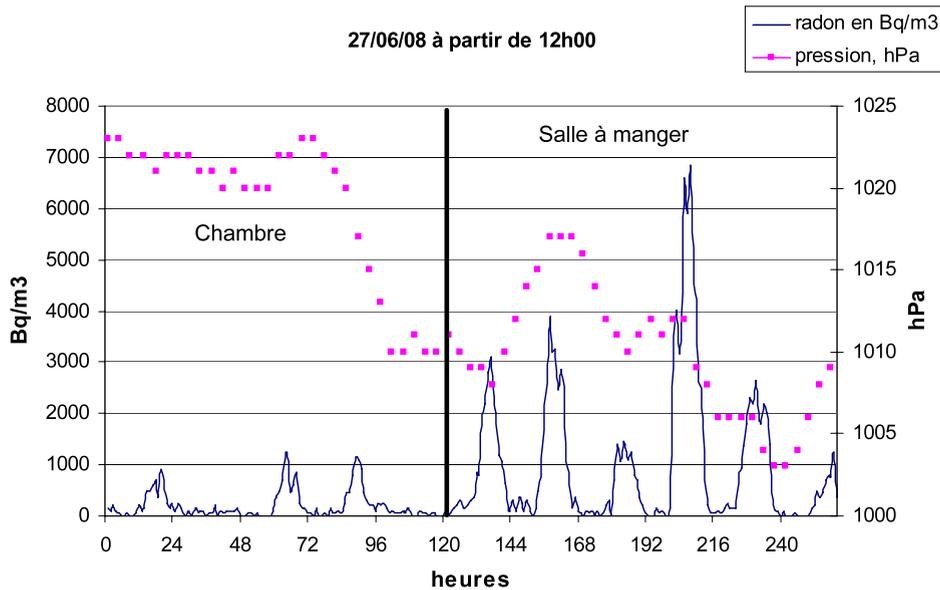


Fig. 2. Les concentrations en radon dans la maison en juin 2008.

Les mesures ont été effectuées dans 2 pièces au rez de chaussée : la chambre et la salle à manger (SAM), alors que la maison était occupée (et chauffée à 19 °C en hiver). Notre étude s'appuie sur la méthode de prélèvements en continu permettant de suivre la concentration en radon en fonction du temps. De plus, les relevés de la température et de la pression extérieure, obtenus à la station météorologique de Caen-Carpique (situé à moins de 20 km de la maison test) ont été étudiés.

3. Résultats et discussion

3.1. Situation initiale

La Fig. 2 représente les concentrations en radon dans la maison testée en juin 2008. Les mesures ont débuté le 27/06/08 à 12h00, elles ont duré 5 jours dans la chambre et 5 jours dans la salle à manger. La moyenne obtenue sur ces 5 premiers jours est de 194 Bq/m³, tandis qu'elle est de 1123 Bq/m³ les 5 jours suivant. Ces valeurs moyennes sont relativement importantes, surtout la valeur obtenue dans la salle à manger où l'activité volumique dépasse 1000 Bq/m³. Sur la Fig. 2 est reportée la valeur de la pression atmosphérique extérieure (en hPa) sur le site proche de Caen-Carpique (selon le site web de Météo France); il semble que, dans ce cas d'étude, la valeur de la pression extérieure influence peu la concentration en radon à l'intérieur de la maison.

Le radon présent dans l'air à l'intérieur de cette habitation peut avoir 3 origines :

- certains matériaux de construction ayant une teneur en radium élevée (comme les bétons de schistes alunifères, roche granitique, etc.) peuvent contribuer à la concentration en radon de l'air intérieur;
- l'eau à usage domestique peut contenir du radon à des concentrations très élevées (si celle-ci provient de nappes souterraines situées dans des régions riches en radon);
- exhalation directe du radon venant du sous-sol. Dans ce cas, la maison traditionnelle, bien calfeutrée sur un sol en terre battue ou sur une cave profonde, avec son unique cheminée pour réaliser une aspiration contrôlée, est un véritable piège à radon. C'est évidemment beaucoup mieux lorsque les fondations sont faites avec un vide sanitaire connecté directement à l'extérieur, que la dalle de sol est étanche et que l'on assure une bonne aération du logis. Cette exhalation directe du radon du sol peut se faire (selon [2]) soit :
 - par transfert convectif : lorsque l'air intérieur du bâtiment est plus chaud que l'air extérieur; cela entraîne un mouvement d'air dans le bâtiment appelé le « tirage thermique ». Ce tirage thermique génère une légère dépression au niveau du sol du bâtiment vis-à-vis de son environnement extérieur et notamment du sol sous le bâtiment. Le moteur est donc la différence de pression qui existe entre le sol et l'intérieur du bâtiment, qui entraîne un mouvement d'air depuis le sol vers le bâtiment. Le radon, présent dans l'air contenu dans la porosité du sol, est alors aspiré dans le bâtiment et y séjournera en fonction du niveau de renouvellement d'air de ce dernier;
 - par transfert diffusif : lorsque deux volumes d'air ayant des concentrations en polluants différentes sont en présence, les polluants vont se déplacer de manière à tendre vers une concentration homogène des deux volumes d'air. Le radon peut donc diffuser depuis le sol ou le sous-sol vers l'air atmosphérique ou vers l'air intérieur d'un bâtiment.

Tableau 1

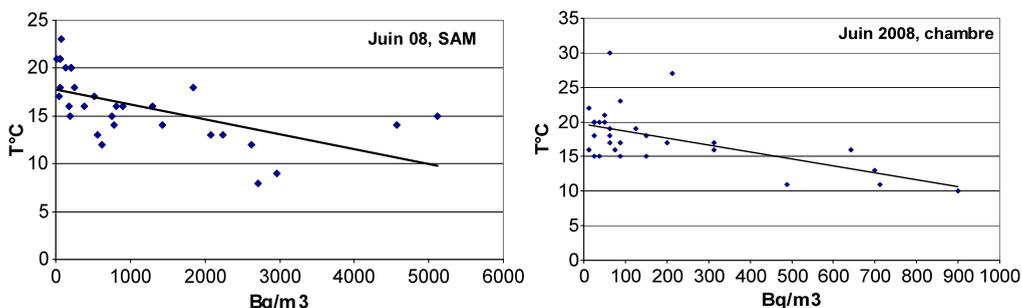
Valeurs moyennes, en radon, mesurées sur 5 jours, dans la chambre de la maison. Valeurs moyenne sur la même période en pression et température (selon le site de Météo France, à la station de Caen-Carpiquet).

	sans aération		avec aération			
	sans VMI		avec VMI		sans VMI	
	27/06/08		24/06/09		14/11/08	
Radon moyenne (Bq/m ³)	194	37	25	93	212	197
Radon maximum (Bq/m ³)	1250	250	200	450	500	700
Pression moyenne	1019	1014	1016	1014	1021	1002
Température moyenne	18	19	20	14	10	6

Tableau 2

Valeurs moyennes, en radon, mesurées sur 5 jours, dans la salle à manger de la maison. Valeurs moyenne sur la même période en pression et température (selon le site de Météo France, à la station de Caen-Carpiquet).

	sans aération		avec aération			
	sans VMI		avec VMI		sans VMI	
	02/07/08		14/06/09		18/11/08	
Radon moyenne (Bq/m ³)	1123		56		214	139
Radon maximum (Bq/m ³)	6800		350		600	500
Pression moyenne	1011		1020		1019	993
Température moyenne	16		16		9	5

**Fig. 3.** Tirage thermique la nuit.

Ce mode de transfert est prédominant lorsque les matériaux sont une source de radon importante (cas rares). C'est également un mécanisme important dans le cas où l'interface sol/bâtiment est très ouverte (par exemple : sol de cave en terre battue). Ceci explique le fait que même en l'absence de différence de pression entre le volume d'air intérieur et le sol, le radon continue à pénétrer dans le bâtiment.

On note, sur la Fig. 2 et sur les Tableaux 1 et 2, une différence importante entre les mesures faites dans la chambre et celles faites dans la salle à manger. La moyenne obtenue dans la chambre est de 194 Bq/m³, avec 1250 Bq/m³ comme valeur maximale obtenue au bout de 64 heures (donc à 4h00 du matin), tandis que la moyenne dans la salle à manger est de 1123 Bq/m³ et la mesure la plus importante (6800 Bq/m³) est obtenue au bout de 208 heures (donc à 4h00 du matin aussi). Cette différence est vraisemblablement liée à la présence de la cheminée dans la salle à manger qui, même éteinte, accélère le tirage thermique de cette pièce (dû à la montée de l'air chaud), et par là, la mise en dépression de cette salle et donc le transfert convectif du radon dans la pièce.

On note aussi sur cette Fig. 2 l'alternance de périodes de jour, caractérisées par de faibles concentrations en radon et des périodes de nuit caractérisées par des concentrations en radon beaucoup plus élevées. Ceci peut être expliqué par une différence au niveau des températures extérieures. En effet, si l'on reporte les valeurs en radon obtenues dans la maison test en fonction de la température extérieure mesurée sur le site proche de Caen-Carpiquet (selon le site de Météo France), on s'aperçoit que plus la température extérieure est froide et plus le taux de radon dans la maison est important que ce soit dans la chambre ou dans la SAM (Fig. 3). Ceci est expliqué par l'augmentation du tirage thermique la nuit, directement lié à la différence de température entre l'extérieur et l'intérieur de la maison [13–15].

3.2. Situation après travaux

A la vue de ces résultats, il semble évident que la concentration en radon dans cette maison a pour origine une exhalation directe du radon venant du sous sol via un transfert convectif du radon directement lié à la différence de température entre l'extérieur et l'intérieur de la maison. Ainsi, des travaux sont effectués dans cette habitation afin de diminuer ce transfert

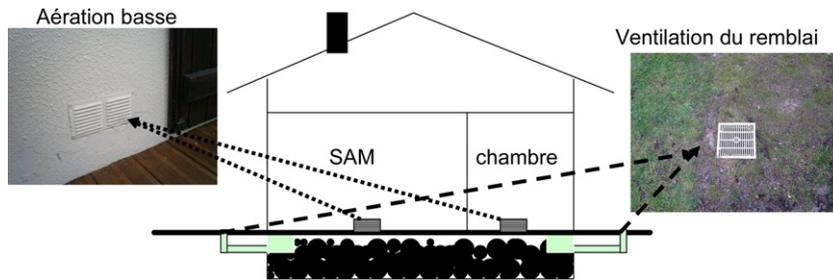


Fig. 4. Aérations basses pour limiter les phénomènes de dépressions dus au tirage thermique.

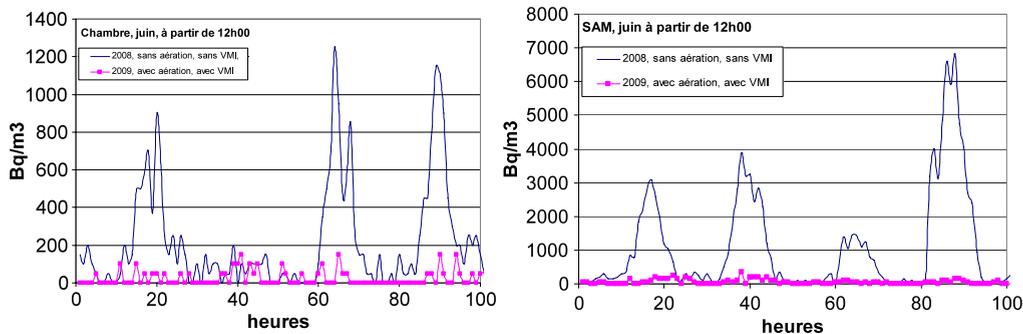


Fig. 5. Vérification de l'efficacité des travaux effectués.

convectif. En effet, la mise en place d'une ventilation naturelle dans une maison peut permettre de diminuer la teneur en radon de cette maison par simples effets combinés de dilution et de diminution de la dépression à l'intérieur de la maison (de 800 à 150 Bq/m³ selon les tests effectués par [16]). La première série de travaux consiste donc à créer des aérations basses. Deux aérations basses (diamètre 10 cm) sont percées dans la salle à manger et une dans la chambre, afin de limiter les phénomènes de dépressions dus au tirage thermique (Fig. 4). De plus, afin de limiter les phénomènes de migration du radon du sol vers la maison, une ventilation, entre la dalle et le remblai affaissé, est effectuée en créant dans le remblai de la maison, 4 cavités de 50 cm³ environ, raccordées à l'extérieur par un tube de 10 cm de diamètre (Fig. 4).

La seconde série de travaux consiste à installer une VMI (Ventilation Mécanique par Insufflation), dont le principe consiste à prendre de l'air sur le toit de la maison et à l'injecter (à raison de 82 m³/h) dans la maison à une température supérieure ou égale à 15 °C (chauffage thermique en hiver uniquement) à l'intérieur de cette habitation afin de diminuer la dépression « naturelle » du bâtiment. A la suite de ces travaux, des mesures sont effectuées à la même période de l'année (fin juin, début juillet) et dans les mêmes conditions. En effet, comme l'activité du radon présente une très grande variabilité dans le temps [6,14,15], nous avons effectué nos mesures sur une même période de l'année et sur 5 jours consécutifs (aux mêmes horaires) pour permettre une comparaison probante entre les 2 années 2008 et 2009.

Les mesures débutent dans la chambre le 27/06/08 à 12h00 pour la première série (sans aération basse ni VMI) et le 01/07/09 à 12h00 pour la seconde série (avec aérations basses et VMI), dans la salle à manger le 2/07/08 à 12h00 pour la première série (sans aération basse ni VMI) et le 15/06/09 à 12h00 pour la seconde série (avec aérations basses et VMI). Les résultats obtenus permettant de vérifier l'efficacité des travaux effectués sont représentés sur la Fig. 5. L'efficacité des travaux effectués semble évidente, que ce soit au niveau de la chambre ou de la salle à manger puisque les valeurs chutent respectivement de 194 à 25 Bq/m³ et de 1123 à 56 Bq/m³.

Afin de distinguer l'impact des différents travaux effectués, des mesures sont faites avec ou sans VMI à différentes périodes de l'année. D'après la Fig. 2, la pression atmosphérique extérieure influe peu sur la teneur en radon à l'intérieur de la maison, étant donné que des différences importantes sont notées entre la nuit et le jour, et qu'il n'y a peu de différence de pression entre la nuit et le jour suivant. Par contre, la Fig. 3 met en évidence une relation inversement proportionnelle entre la concentration en radon à l'intérieur de la maison et la température extérieure. D'autres paramètres, non pris en compte ici, comme par exemple les petites variations de température à l'intérieur de la maison ou la force et la direction du vent au regard de la maison test peuvent expliquer la forte variation des résultats autour de la droite d'interpolation. Cependant, d'autres mesures faites dans la chambre (Tableau 1) et dans la salle à manger (Tableau 2) sur une moyenne de 5 jours de mesures viennent confirmer cette relation inversement proportionnelle entre la concentration en radon à l'intérieur de la maison et la température extérieure. En effet, en comparant la concentration moyenne en radon dans la SAM dans les mêmes conditions (avec aération et VMI) en janvier 2009 ($T_{\text{moy}}^{\circ} = 5^{\circ}\text{C}$) et en juin 2009 ($T_{\text{moy}}^{\circ} = 16^{\circ}\text{C}$), on observe une baisse de la concentration en radon de 139 à 56 Bq/m³. Le même phénomène peut être observé en comparant les concentrations moyennes dans la chambre dans les mêmes conditions (avec aération et VMI) en janvier 2009 ($T_{\text{moy}}^{\circ} = 6^{\circ}\text{C}$),

début en juin 2009 ($T_{\text{moy}}^{\circ} = 14^{\circ}\text{C}$) et fin juin 2009 ($T_{\text{moy}}^{\circ} = 20^{\circ}\text{C}$). On observe une baisse de la concentration moyenne en radon de 197 à 93 Bq/m³, puis 25 Bq/m³.

Par ailleurs, les Tableaux 1 et 2, permettent d'évaluer l'impact de l'installation d'une VMI dans cette maison. En effet, si l'ensemble des travaux réalisés (aérations basses, aération du remblai et installation d'une VMI) a eu un impact important sur la teneur moyenne en radon dans cette maison (Fig. 5), il semble que ce soit surtout les aérations basses et les aérations du remblais qui ont permis cette diminution importante de la teneur en radon. En effet, si l'on compare la teneur moyenne en radon dans la chambre, pour une température extérieure comparable (19–20 °C), les valeurs obtenues en juin 2009 avec ou sans VMI sont du même ordre de grandeur (37 et 25 Bq/m³). Même si l'on note une légère baisse, celle-ci peut être due soit à la VMI, soit à l'augmentation de la température extérieure (+1 °C), soit encore à des variations de la force et/ou de la direction du vent au regard de la maison test. Par contre, si l'on compare les valeurs moyennes obtenues en novembre 2008 (avec aérations basses et du remblais, sans VMI) aux valeurs obtenues en janvier 2009 (avec les aérations et avec VMI), on note malgré la baisse de la température extérieure, une diminution de la teneur moyenne en radon (de 214 à 139 Bq/m³ dans la SAM et de 212 à 197 Bq/m³ dans la chambre). Il apparaît donc que la VMI a un impact positif important, essentiellement quand les températures extérieures sont relativement basses (en automne, hiver).

4. Conclusion

La quantité de radon à l'intérieur d'une maison dépend de la présence (ou non) de radon dans le sous-sol, de la perméabilité du sol et de la différence de pression entre l'habitat et le terrain sur lequel il est bâti. Il s'agit donc d'éviter le plus possible que la maison soit en état de sous pression. Dans le cas de notre étude, la mise en place d'aérations basses (diamètre 10 cm) et d'une aération du remblai de la maison ont permis de diminuer grandement la concentration en radon. De plus, l'installation ultérieure de la VMI a contribué à diminuer encore la concentration en radon à l'intérieur de cette maison. Cette solution semble donc être efficace vis-à-vis de la concentration en radon à l'intérieur d'un bâtiment, même si mal dimensionnée elle peut entraîner un mauvais fonctionnement des appareils de combustion. Par ailleurs, à la vue de ces résultats, on peut se poser la question de l'impact d'une VMC (Ventilation Mécanique Contrôlée) par extraction dans un bâtiment situé sur une zone géographique riche en radon. En effet, la VMC par extraction a pour conséquences d'accroître la dépression dans un bâtiment et par conséquent le flux entrant de radon [17].

Remerciements

Remerciements à l'attention de Yannick Reinert pour la conception et la réalisation des travaux dans cette maison test.

Références

- [1] B. Melloni, A. Vergnenègre, P. Lagrange, F. Bonnaud, Radon et exposition domestique, *Revue Maladie Respiratoire* 17 (2000) 1061–1071.
- [2] B. Collignan, B. Sullerot, Le radon dans les bâtiments, in : Guide pour la remédiation dans les constructions existantes et la prévention dans les constructions neuves, CSTB, 2008, 164 p..
- [3] J.H. Lubin, J.D. Boice, J.C. Edling, R.W. Hornung, G.R. Howe, E. Kunz, et al., Radon and lung cancer risk: A joint analysis of 11 underground miner studies, National Institutes of Health, NIH Publication, N° 94-3644, 1994, 235 p.
- [4] M. Tirmarche, Evaluation du risque de cancer lié à l'inhalation du radon, *Revue de l'ACOMEN* 4 (1998) 337–344.
- [5] H. Baysson, M. Tirmarche, Risque de cancer du poumon après exposition au radon : État des connaissances épidémiologiques, *Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement* 69 (1) (2008) 58–66.
- [6] H. Baysson, M. Tirmarche, G. Tymen, S. Gouva, D. Caillaud, J.C. Artus, A. Vergnenegre, F. Ducloy, D. Laurier, Exposition domestique au radon et risque de cancer du poumon : Les résultats d'une étude épidémiologique menée en France (Indoor radon exposure and lung cancer risk. Results of an epidemiological study carried out in France), *Revue des Maladies Respiratoires* 22 (4) (2005) 587–594.
- [7] H. Métivier, M.C. Robé, Le radon de l'environnement à l'homme, Collection, Livre IPSN, EDP Sciences, 1999.
- [8] S. Darby, D. Hill, A. Auvinen, J.M. Barros-Dios, H. Baysson, F. Bochicchio, Radon in homes and risk of lung cancer: Collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies, *BMJ* 330 (7485) (2005) 223, doi:10.1136/bmj.38308.477650.63.
- [9] O. Catelinois, A. Rogel, D. Laurier, S. Billon, D. Hemon, P. Verger, M. Tirmarche, Lung cancer attributable to indoor radon exposure in France: Impact of the risk models and uncertainty analysis, *Environmental Health Perspectives* 114 (2006) 1361–1366.
- [10] O. Catelinois, A. Rogel, S. Billon, D. Laurier, D. Hemon, P. Verger, M. Tirmarche, Estimation de l'impact sanitaire attribuable au radon domestique en France, *Revue d'Épidémiologie et de Santé Publique* 53 (2005) 448.
- [11] Arrêté du 22 juillet 2004, relatif aux modalités de gestion du risque lié au radon dans les lieux ouverts au public, J.O. du 11 août, 2004.
- [12] Z. Pokryszka, Suivi et évaluation des échanges gazeux en liaison avec des anciens travaux souterrains de la mine de fer de May-sur-Orne (14). Bilan des travaux, synthèse et interprétation des résultats, rapport INERIS DRS-09-94432-12540A, 2009.
- [13] J.P. Rydock, A. Næss-Rolstad, J.T. Brunzell, Diurnal variations in radon concentrations in a school and office: Implications for determining radon exposure in day-use buildings, *Atmospheric Environment* 35 (2001) 2921–2926.
- [14] B. Zmazek, J. Vaupotič, Coping with radon problem in a private house, *Building and Environment* 42 (2007) 3685–3690.
- [15] M. Singh, K. Singh, S. Singh, Z. Papp, Variation of indoor radon progeny concentration and its role in dose assessment, *Journal of Environmental Radioactivity* 99 (2008) 539–545.
- [16] A. Cavallo, K. Gadsby, T.A. Reddy, Comparison of natural and forced ventilation for radon mitigation in houses, *Environment International* 22 (1996) 1073–1078.
- [17] Y. Bonnefous, Etude numérique des systèmes de ventilation du sol pour diminuer la concentration en radon dans l'habitat (Subslab ventilation systems for reducing indoor radon concentration: A numerical approach), Thèse de l'Institut national des sciences appliquées de Lyon, Villeurbanne, France, INIST-CNRS, Cote INIST : T 84282, 1992.