

Université de Montréal

Analyse de l'association entre la densité/proximité de puits d'exploitation de pétrole et de gaz naturel et les concentrations de radon à l'intérieur des résidences du Nord-Est de la Colombie-Britannique

Par

Emmanuel Bourdet

Ecole de santé publique de l'Université de Montréal, département de santé environnementale et santé au travail

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de Maîtrise en santé environnementale et santé au travail, option générale avec mémoire

Août 2022

© Bourdet Emmanuel, 2022

Université de Montréal

Unité académique : Département de santé environnementale et santé au travail, école de santé
publique (ESPUM)

Ce mémoire intitulé

Analyse de l'association entre la densité/proximité de puits d'exploitation de pétrole et de gaz
naturel et les concentrations de radon à l'intérieur des résidences du Nord-Est de la Colombie-
Britannique

Présenté par

Emmanuel Bourdet

A été évalué(e) par un jury composé des personnes suivantes

Marie-Pierre Sylvestre

(Présidente-rapporteuse)

Marc-André Verner

(Directeur de recherche)

Élyse Caron-Beaudoin

(Codirectrice)

Patrick Poulin

(Membre du jury)

Résumé

L'exploitation gazière et pétrolière, parfois associée à de la fracturation hydraulique, peut entraîner l'émission de contaminants comme le radon dans les régions présentant des puits d'exploitation. L'objectif de cette étude était d'évaluer l'association entre la densité/proximité des puits de gaz et de pétrole et les concentrations de radon dans l'air intérieur des résidences du Nord-Est de la Colombie-Britannique. Une base de données comprenant 497 concentrations de radon mesurées dans des résidences de cette région a été utilisée. Cette base de données contenait plusieurs études de mesure du radon réalisées entre 1992 et 2019, dont des données de l'étude EXPERIVA et un regroupement de données (*British Columbia Radon Data Repository*) réalisé par le British Columbia Centre for Disease Control. En matière d'exposition, une approche par pondération de la distance inverse (appelée *Inverse Distance Weighting*, ou IDW), et le nombre des puits furent calculés dans trois périmètres autour des habitations (2.5, 5 et 10 km), permettant d'estimer pour chaque habitation l'importance de l'exposition aux puits d'exploitation (par leur proximité et la densité des puits). L'analyse de l'association entre les IDW ou le nombre de puits, et la concentration de radon a été faite par analyse de régression linéaire multiple, ajustée pour l'étage de la résidence auquel la mesure fut réalisée (sous-sol ou autre étage). Une plus grande concentration de radon a été mesurée dans les sous-sols qu'aux étages supérieurs. Des associations statistiquement significatives et négatives ($p < 0.05$) ont été observées entre la densité/proximité des puits et les concentrations de radon. Cela a mis en avant que, dans l'échantillon, les régions présentant des densités de puits plus hautes étaient associées avec une concentration de radon plus faible, avec une différence de concentration de radon de 0.1% par puits additionnel dans un rayon de 10 km (I.C. 95% : 0.05 ; 0.20). Nous n'avons observé aucune association positive entre les mesures de densité/proximité des puits et les concentrations de radon. Les associations négatives retrouvées étaient principalement influencées par les mesures de radon réalisées en 1992, période durant laquelle l'exploitation gazière et pétrolière n'utilisait

que très peu la fracturation hydraulique. Ainsi, il serait intéressant d'approfondir ce travail, en incluant un échantillon plus large et comprenant plus de données en milieu rural. Aussi, l'inclusion de covariables additionnelles pourrait mieux contrôler la contribution potentielle d'autres facteurs (p. ex. âge et état du bâtiment, type d'isolation et de ventilation, phase de l'exploitation gazière ou pétrolière lors de la mesure radon).

Mots-clés : Radon, matrice d'exposition, IDW, exploitation pétrolière et gazière

Abstract

Northeastern British Columbia (Canada) is a region of oil and gas exploitation. Oil and gas extraction activities can emit contaminants, including radon, but studies on indoor air contaminants in regions of oil and gas exploitation are scarce. This study aimed to evaluate the association between the density/proximity of oil and gas wells and indoor air radon concentrations in Northeastern British Columbia.

Data from the *British Columbia Radon Data Repository* (BCRDR) and the Exposures in the Peace River Valley study (EXPERIVA) were used, with 497 radon measurements taken from dwellings between 1992 and 2019. Within different buffer zones around each dwelling (2.5, 5 and 10 km), well density was calculated and an exposure metric, Inverse Distance Weighting (IDW), of both well density and proximity was derived. Linear regression models were used to evaluate the associations between well density and IDW and indoor air radon concentrations while adjusting for the floor where measurement was taken.

A higher radon concentration was measured in basements than upper floors. Statistically significant and negative associations ($p < 0.05$) were observed between well density/proximity and radon concentrations. For example, an increase of one well within 10 km was associated with a modest decrease of 0.1% (95% CI: 0.05; 0.20) in radon concentrations. We observed no positive association between well density/proximity measurements and radon concentrations. The negative associations were primarily influenced by radon measurements made in 1992, when oil and gas development used very little hydraulic fracturing.

Additional studies with more measurements, information on dwelling type, and phase of oil and gas operations could allow a more precise and powerful analysis.

Keywords : Radon, gas development, exposure science, IDW

Table des matières

Résumé.....	3
Abstract.....	5
Liste des tableaux	9
Liste des figures	10
Liste des sigles et abréviations.....	11
Remerciements	12
1. Introduction	13
1.1 Exploitation du pétrole et gaz naturel : techniques et réglementations	15
1.1.1 Production de pétrole et de gaz naturel au Canada	15
1.1.2 Réglementation de la production de pétrole et de gaz naturel au Canada	18
1.1.3 Exploitation pétrolière et gazière en Colombie-Britannique.....	19
1.1.4 Définition et caractéristiques de la fracturation hydraulique	22
1.2 Le radon : caractéristiques et enjeux.....	24
1.2.1 Définitions et caractéristiques.....	24
1.2.2 Les effets sur la santé du radon.....	30
1.2.3 Le radon et la fracturation hydraulique.....	31
1.3 Présentation de l'étude EXPERIVA, et objectifs du travail sur le radon	38
1.3.1 Présentation de l'étude EXPERIVA	38
1.3.2 Objectifs du travail sur le radon	39
2. Méthodes	41

2.1	Obtention d'une base de données radon	41
2.1.1	Mesures de radon dans l'étude EXPERIVA.....	41
2.1.2	Mesures de radon par le BCCDC	42
2.2	Analyses statistiques	44
2.2.1	Analyse générale des niveaux de radon et selon l'étage	44
2.2.2	Estimation de la densité et proximité des puits de pétrole et de gaz naturel par la méthode IDW	45
2.2.3	Analyses de régression	46
3.	Article	48
3.1	Abstract	51
3.2	Introduction	52
3.3	Materials and methods.....	55
3.3.1	Radon databases	55
3.3.2	Oil and gas wells exposure metric: Inverse Distance Weighting	56
3.3.3	Statistical analyses	58
3.4	Results.....	60
3.4.1	Indoor radon concentration.....	60
3.4.2	Associations between density and proximity of oil and gas wells and indoor radon concentrations.....	63
3.4.3	Exploratory analyses: closest well	65
3.4.4	Exploratory analyses: before and after 2007, and year of construction	65
3.5.	Discussion	66

3.5.1 Comparison with other studies.....	66
3.5.2 Strengths and limitations	67
3.6 Conclusion.....	69
Supplementary materials	70
4. Conclusion	77
4.1 Résultats.....	77
4.2 Retombées	79
4.3 Perspectives	80
Bibliographie	82

Liste des tableaux

Tableau 1: Pourcentage pondéré en fonction de la population, de Canadiens habitant dans des maisons où la concentration de radon est inférieure à 200 Bq/m ³ , entre 200 et 600 Bq/m ³ , supérieure à 600 Bq/m ³ et supérieure à 200 Bq/m ³ par province ou territoire	28
Table 2: Indoor radon concentrations in our sample and in Cross-Canada Survey of Radon Concentrations in Homes.....	61
Table 3: Distribution of indoor radon concentrations, IDW and wells density in our study (n=497).....	62
Table 4: Associations between oil and gas wells density, IDW, and indoor radon concentrations	64

Liste des figures

Figure 1 : Comparaison des techniques de production pétrolière et gazière conventionnelles et non-conventionnelles (17)	16
Figure 2 : Production canadienne de gaz naturel entre 2000 et 2013 (15).....	17
Figure 3 : Zones et bassin schisteux importants au Canada (14)	18
Figure 4 : Distribution des puits d'exploitation de pétrole et de gaz naturel mis en service dans le Nord-Est de la Colombie-Britannique en 2014 (20)	20
Figure 5 : Nombre annuel de puits d'exploitation pétrolière et gazière forés entre 1948 et 2014, selon le type d'exploitation (20)	21
Figure 6 : Evolution de la production de gaz en Colombie-Britannique en fonction du type d'exploitation (conventionnel ou non-conventionnel) entre 2009 et 2019 (21).....	21
Figure 7 : Points clés de la fracturation hydraulique (28)	24
Figure 8 : Voies d'entrée du radon dans les bâtiments (29).....	25
Figure 9 : Concentration de radon au Canada (34).....	26
Figure 10 : Capture d'écran de la carte interactive du BCCDC. Concentration de radon dans les régions socio-sanitaires de Colombie-Britannique. 26 juillet 2022 (https://bccdc.shinyapps.io/bcradonmap/).....	29
Figure 11 : Étapes de la réalisation de la base de données finale	43
Figure 12: Representation of wells drilled in Northeastern British Columbia (grey) and study participants (red) (QGIS Desktop 3.26.1)	57

Liste des sigles et abréviations

BCCDC: British Columbia Center for Disease Control

BCRDR: British Columbia Radon Data Repository

EXPERIVA: Exposures in the Peace River Valley

IDW: Inverse Distance Weighting

Bq/m³: Becquerel par mètre cube

EPA: Environmental Protection Agency

AB: Alberta

BC: Colombie-Britannique

MB: Manitoba

NB: Nouveau-Brunswick

NL: Terre-Neuve-et-Labrador

NS: Nouvelle-Écosse

NT: Territoires du Nord-Ouest

NU: Nunavut

ON: Ontario

PE: Île-du-Prince-Édouard

QC: Québec

SK: Saskatchewan

YT: Yukon

UOG: Unconventional Oil and Gas

CI95: 95% Confidence Interval

Remerciements

Je tiens à remercier mes directeurs de recherche, pour leurs disponibilités et enseignements lors de cette formation, malgré la distance et le contexte sanitaire, pour le suivi, les échanges, comme pour les formations improvisées en rédaction d'article, biostatistiques, codages en R, géologie et bien d'autres.

Je remercie également l'ensemble des Professeurs et étudiants de l'Université qui ont pu intervenir lors de ma maîtrise.

Merci à ma ressource en géographie, qui je l'espère pourra appliquer un jour ses compétences à la santé des populations.

Merci aux autres étudiants du laboratoire, malheureusement nous n'aurons pas eu l'opportunité de nous rencontrer en présentiel, à charge de revanche ! Bonne continuation à tous.

Merci à Maeva&JD.

1. Introduction

L'exploitation de pétrole et de gaz naturel, pouvant être associée à la fracturation hydraulique, est un procédé fortement présent au Canada ainsi qu'aux États-Unis (1). Cette exploitation, visant à fournir de l'énergie aux citoyens nord-américains, est de plus en plus étudiée par les chercheurs en santé environnementale pour son impact sur l'environnement et la santé.

Par exemple, différentes études épidémiologiques ont pu mettre en avant certains impacts environnementaux de l'exploitation de pétrole et de gaz naturel couplés à de la fracturation hydraulique. On peut notamment citer une altération de la qualité de l'eau souterraine au Texas dans les puits artésiens proches des exploitations (2). Parallèlement à ces impacts sur l'eau, l'extraction de gaz naturel par fracturation hydraulique entraîne une libération de plusieurs contaminants dans l'air (3), comme des composés organiques volatiles ou des éléments traces. Par exemple, le benzène, le formaldéhyde ou bien le sulfure d'hydrogène, ont été mesurés à des concentrations supérieures aux concentrations associées à un risque pour la santé humaine dans des secteurs à proximité de zones d'exploitation pétrolière et gazière (4-6). Une revue de la littérature réalisée par Long et al. (2019) a identifié 20 études qui ont permis de mettre en évidence 11 contaminants pouvant émaner des exploitations de pétrole et de gaz de la formation *Marcellus Shale* aux États-Unis (7).

Parmi les contaminants associés à l'exploitation gazière et pétrolière, le radon pourrait voir sa concentration augmenter dans l'air extérieur et intérieur dans les territoires proches de zones d'exploitation (8-11). Les effets du radon sur la santé sont largement étudiés, notamment au regard du développement du cancer du poumon (12, 13), mais qu'en est-il de l'association entre l'exploitation gazière et pétrolière et l'exposition humaine au radon ?

Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'étude EXPERIVA (*Exposures in the Peace River Valley*), débutée en 2019, et traitant de l'exposition gestationnelle aux contaminants issus de l'exploitation

pétrolière et gazière dans le Nord-Est de la Colombie-Britannique. L'objectif général de mon travail de maîtrise était de compiler les concentrations de radon à l'intérieur des logements dans cette région et d'investiguer les associations entre la proximité et densité des puits de pétrole et de gaz naturel et les concentrations de radon. Afin d'exposer ce sujet, il convient de présenter dans un premier temps les techniques et les enjeux de l'exploitation gazière et pétrolière conventionnelle et non-conventionnelle, notamment dans les cas où la fracturation hydraulique est utilisée. Ensuite, les caractéristiques du radon et ses conséquences sur l'organisme seront abordées. Dans un troisième temps, la relation entre le radon et l'exploitation gazière et pétrolière sera traitée par une analyse de la littérature existante. Enfin, une présentation de l'étude EXPERIVA, des premiers résultats obtenus, et des objectifs de ce travail seront proposés.

1.1 Exploitation du pétrole et gaz naturel : techniques et réglementations

1.1.1 Production de pétrole et de gaz naturel au Canada

Deux principales techniques sont utilisées dans l'exploitation du pétrole et du gaz naturel : le forage par puits verticaux, ainsi que le forage horizontal (généralement couplé à la fracturation hydraulique) (14). Bien que les premières exploitations de pétrole et de gaz naturel par forages verticaux au Canada datent du 19^{ème} siècle, c'est autour des années 1940 que les premières techniques incluant la fracturation hydraulique furent développées (15, 16). Le gaz naturel ou le pétrole exploité depuis des puits verticaux est appelé pétrole ou gaz naturel classique, son extraction est relativement abordable et économique. Néanmoins, dans les régions présentant des ressources pétrolières et gazières provenant de réservoirs étanches, ou de schistes, la quantité de gaz ou de pétrole produit est moins importante et, sur le long terme, son exploitation est moins viable économiquement que celle du gaz naturel ou du pétrole non-conventionnel (14, 15). L'exploitation de ces ressources non-conventionnelles est possible, en partie, grâce à l'utilisation de la fracturation hydraulique (14). La figure 1 présente les deux techniques d'exploitations pétrolière et gazière, verticale (*conventional*) et horizontale couplée à la fracturation hydraulique (*unconventional*) (17).

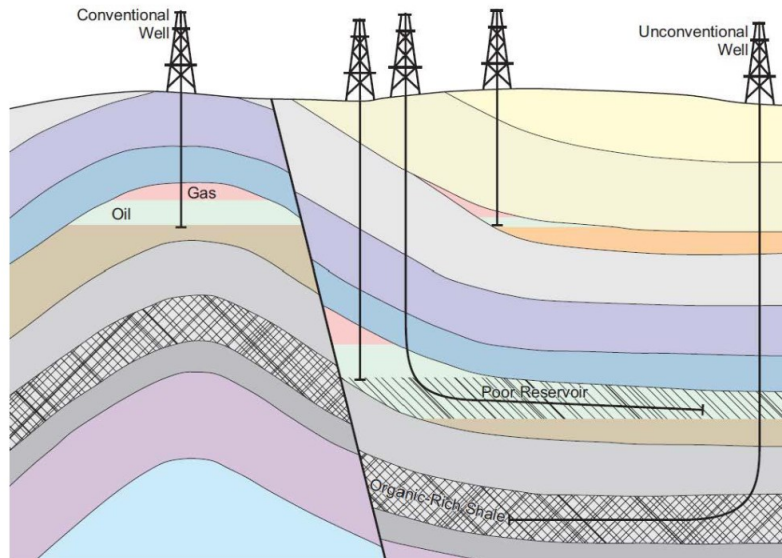


Figure 1 : Comparaison des techniques de production pétrolière et gazière conventionnelles et non-conventionnelles (17)

Au début du 21^{ème} siècle, une augmentation importante de l'exploitation non-conventionnelle a eu lieu en Amérique du Nord (notamment au Canada). La figure 2 montre la constante augmentation de la production de gaz de schiste et de réservoirs étanches, soit deux gaz naturels non-conventionnels exploités grâce à la fracturation hydraulique (14, 15).

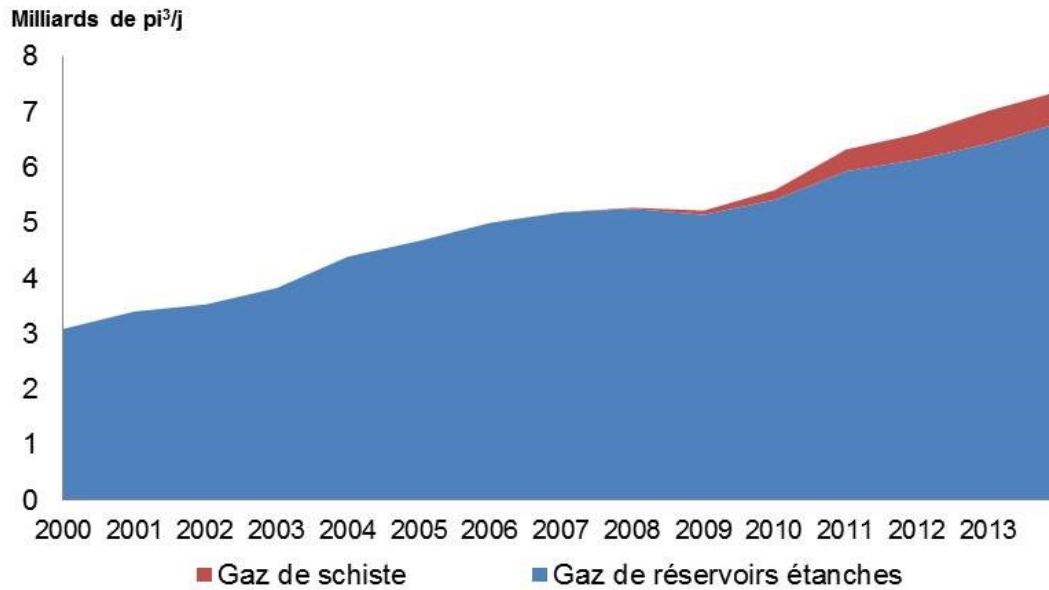


Figure 2 : Production canadienne de gaz naturel entre 2000 et 2013 (15)

Les ressources en gaz naturels et en pétrole sont inégalement situées sur le territoire canadien. En effet, les zones et bassins schisteux (permettant une importante exploitation) sont principalement localisés en Alberta et en Colombie-Britannique, comme l'indique la figure 3 ci-dessous (14).

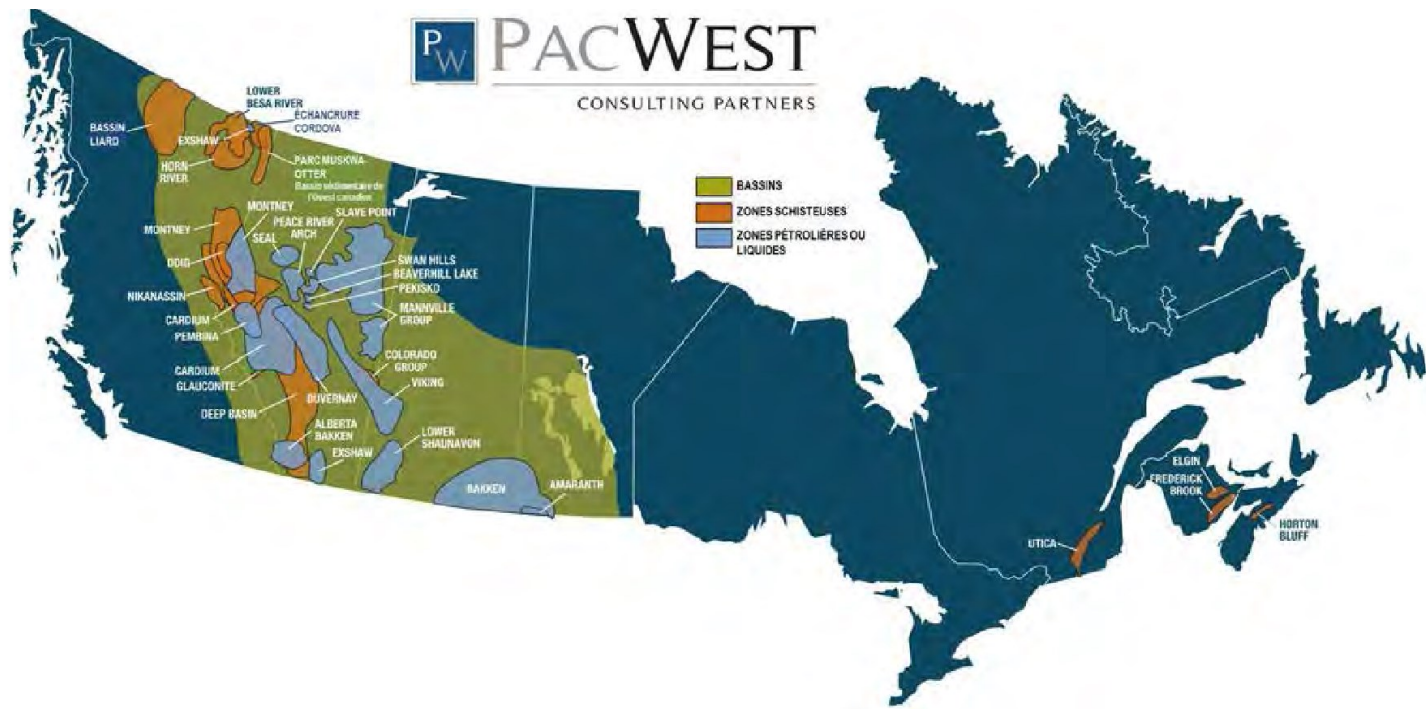


Figure 3 : Zones et bassin schisteux importants au Canada (14)

1.1.2 Réglementation de la production de pétrole et de gaz naturel au Canada

La réglementation relative à la production de gaz naturel et de pétrole au Canada relève de champs de compétences fédérales et provinciales. La responsabilité fédérale concerne principalement le « commerce de l'énergie interprovincial et international, les pipelines franchissant des frontières, la prévention de la pollution, la protection des habitats, la supervision réglementaire des produits chimiques » (18). Au niveau provincial, les gouvernements régulent et réglementent les droits et l'accès aux ressources naturelles par les exploitants de gaz et de pétrole (18). Il existe également une agence de régulation de l'exploitation gazière et pétrolière en Colombie-Britannique, la British Columbia Oil and Gas Commission (BCOGC). Cette agence recouvre différentes missions, incluant l'évaluation et la régulation des demandes d'activités pétrolières et gazières, l'assistance et la consultation auprès des industriels, ils collaborent également avec les Premières Nations dans le cadre de l'exploitation des territoires de la

Colombie-Britannique (19). Aussi, ils sont garants de la connaissance des impacts de l'exploitation pétrolière et gazière en assurant la sécurité et la protection de la population et de l'environnement (19).

1.1.3 Exploitation pétrolière et gazière en Colombie-Britannique

L'étude EXPERIVA se déroulant en Colombie-Britannique, il est intéressant de se questionner sur la place de l'exploitation pétrolière et gazière dans cette province. En 2019, 27% du gaz naturel produit au Canada venait de Colombie-Britannique (1). La Figure 3, présentée précédemment, met d'ailleurs en avant la grande concentration de zones et bassins schisteux dans cette province. On remarque notamment que les zones et bassins schisteux, c'est-à-dire des régions comprenant des formations de roches sédimentaires, sont principalement concentrés dans l'est et le Nord-Est de la province (14). Parmi ces bassins, près de 90% des puits sont situés sur le *Montney Play Trend* (20), comme illustré sur la Figure 4.

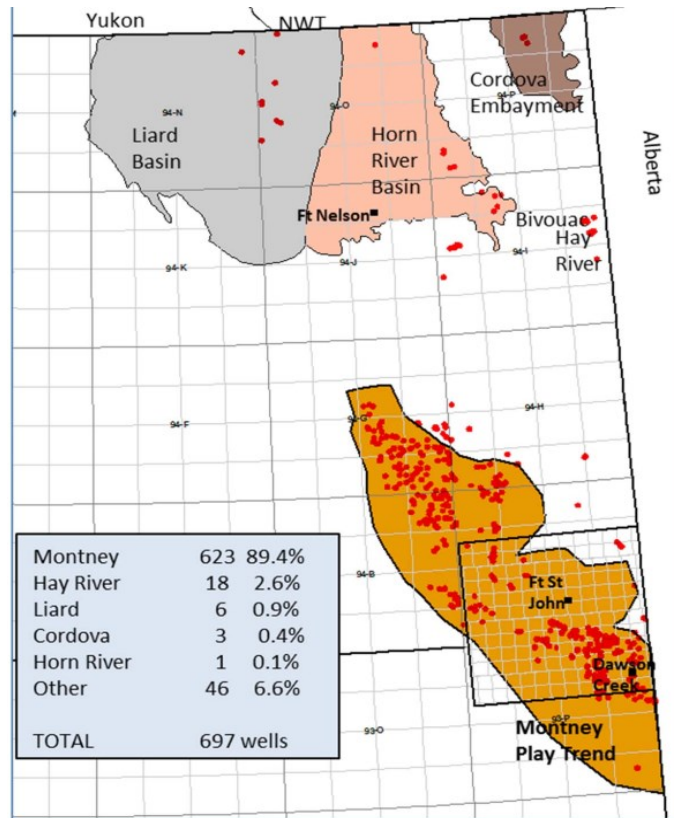


Figure 4 : Distribution des puits d'exploitation de pétrole et de gaz naturel mis en service dans le Nord-Est de la Colombie-Britannique en 2014 (20)

En 2014 en Colombie-Britannique, 697 puits de production de gaz naturels furent mis en service, et le cumul de tous les puits de gaz naturels créés sur la province entre le début du 20^{ème} siècle et 2014 est de 24 325 puits. Ceci met en avant le développement important d'exploitation gazière et pétrolière en Colombie-Britannique (20). Toujours durant l'année 2014, on estime que 86.6% des puits actifs produisent du gaz naturel non-conventionnel (14, 20). Les figures 5 et 6 ci-dessous expriment l'augmentation de la production de puits horizontaux depuis le début du 21^{ème} siècle, permettant l'exploitation de gaz naturel non-conventionnel (20, 21). On remarque une augmentation croissante de la production non-conventionnelle à partir des années 1990, et à la date la plus récente (2019 dans la figure 6), la majorité de la production est non-conventionnelle (20, 21).

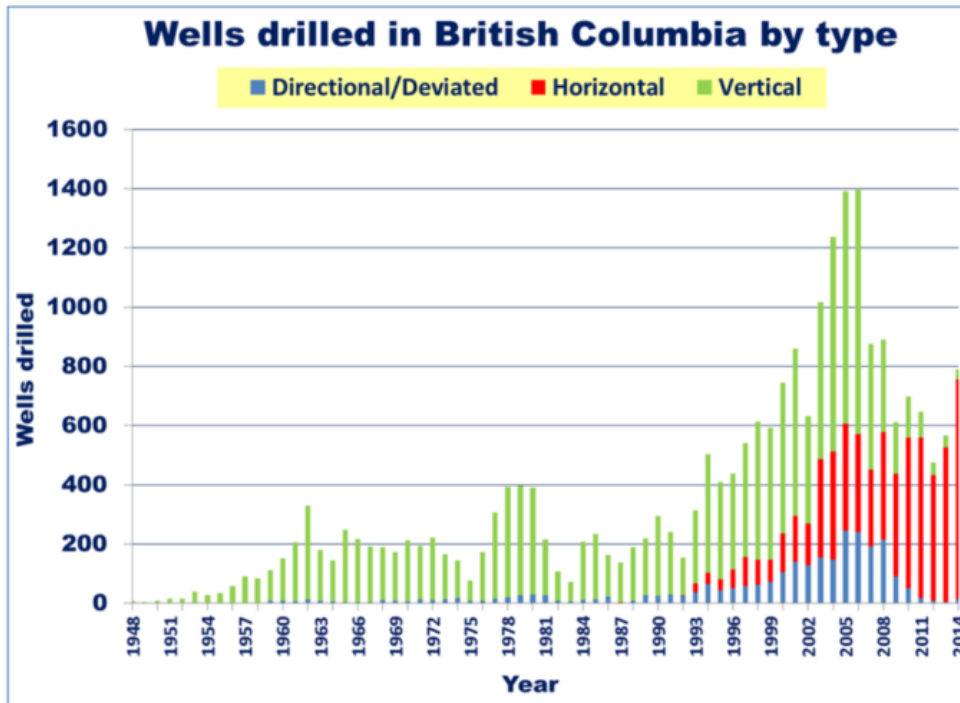


Figure 5 : Nombre annuel de puits d'exploitation pétrolière et gazière forés entre 1948 et 2014, selon le type d'exploitation (20)

Directional/Deviated wells : Puits dont l'axe de forage, initialement vertical, a été dévié de son orientation originelle ; Horizontal wells : puits dont l'axe de forage est vertical, puis horizontal en profondeur ; Vertical wells : puits dont l'axe de forage est uniquement vertical

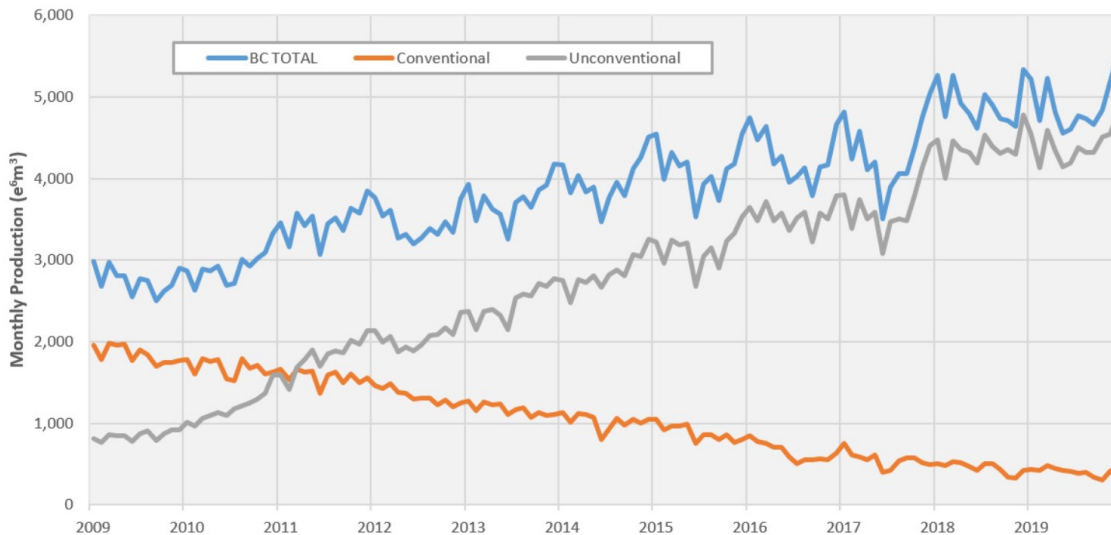


Figure 6 : Evolution de la production de gaz en Colombie-Britannique en fonction du type d'exploitation (conventionnel ou non-conventionnel) entre 2009 et 2019 (21)

1.1.4 Définition et caractéristiques de la fracturation hydraulique

La fracturation hydraulique permet d'extraire des énergies fossiles, telles que le pétrole ou le gaz naturel, qui sont emprisonnées dans la roche de schiste en profondeur. Un premier forage vertical est réalisé à l'aide d'un tubage souvent renforcé par des couches de ciment, dont l'objectif est une isolation efficace du puits, et une limitation des fuites de fluide de fracturation dans les formations géologiques superficielles. Dans un second temps, un forage horizontal est réalisé, celui-ci débutant en profondeur à l'extrémité distale du puits vertical, et pouvant s'étendre sur 1 à 3 km. Le changement d'angle dans le forage est possible grâce à la mise en place d'un moteur hydraulique entre le trépan et la tige de forage, ce moteur permet de détourner le trépan de la trajectoire verticale et de réaliser un forage à l'horizontal (22). Le tubage utilisé pour le forage horizontal est perforé de plusieurs orifices, qui permettront au fluide de pénétrer dans la roche lors de la phase d'injection (14, 15, 23).

Après les phases de forage (vertical puis horizontal), un liquide (ou fluide) est injecté à haute pression dans le tubage (24). Ce fluide est composé principalement d'eau, mais également d'un agent de soutènement (souvent du sable) et de produits chimiques (25). Le rôle de l'eau, injectée sous haute pression, est de briser la roche et d'assumer une mission de vecteur pour les autres composants du fluide (14, 23). L'agent de soutènement est ainsi inséré dans les fissures rocheuses grâce à l'injection d'eau, il assure ainsi le maintien des fissures rocheuses ouvertes, afin de permettre l'écoulement des gaz retenus dans la roche vers le tubage (14, 23). En association avec l'eau et l'agent de soutènement, différents produits chimiques sont utilisés. Ceux-ci peuvent varier en fonction de la composition de la zone à forer (profondeur, température, perméabilité, etc.). On peut rencontrer principalement quatre types de produits : des biocides, des réducteurs de friction, des gélifiants ainsi que des antagonistes aux gélifiants (agents liquéfiant). Les biocides ont pour rôle de prévenir et/ou d'éliminer l'activité bactérienne de la roche causée par le contact avec l'eau, ce qui pourrait en effet entraîner la production de sulfure d'hydrogène,

provoquer une corrosion de l'équipement, ou entraîner un colmatage limitant l'extraction (26). Les réducteurs de friction facilitent la circulation de l'eau. Les gélifiants augmentent la viscosité de l'eau et entraînent un maintien en suspension de l'agent de soutènement, ceci permettant à l'agent susnommé de pénétrer les fissures rocheuses les plus éloignées des orifices du tubage horizontal. Enfin, les antagonistes aux gélifiants interviennent avec un effet décalé dans le temps, permettant de diminuer la viscosité de l'eau afin et permettre le reflux des liquides vers le puits (14, 23, 25, 27).

La pression exercée à l'intérieur du massif rocheux entraîne un déplacement du gaz vers le tubage (10). Le liquide de fracturation est ensuite récupéré à la surface, le liquide récupéré est un mélange de gaz, eau, produits chimiques utilisés mais également de composants de la roche, notamment des métaux, hydrocarbures et des éléments radioactifs naturellement présents dans la roche (25). Après séparation du gaz et des liquides, le gaz récupéré peut être acheminé par pipeline ou transport routier, et les eaux usées sont traitées afin de pouvoir réutiliser une partie de l'eau pour l'exploitation (23). L'usage de l'eau est un élément important de la fracturation hydraulique, un puits d'exploitation pouvant consommer entre 10 000 et 15 000 m³ d'eau, dont seulement une partie pourra être traitée afin de l'utiliser de nouveau. Cela implique des enjeux de gestion de l'eau douce à utiliser, et des risques de contamination de l'environnement par les eaux usées, en fonction de la qualité du traitement de ces dernières (23). La figure 7 illustre la technique de fracturation hydraulique.

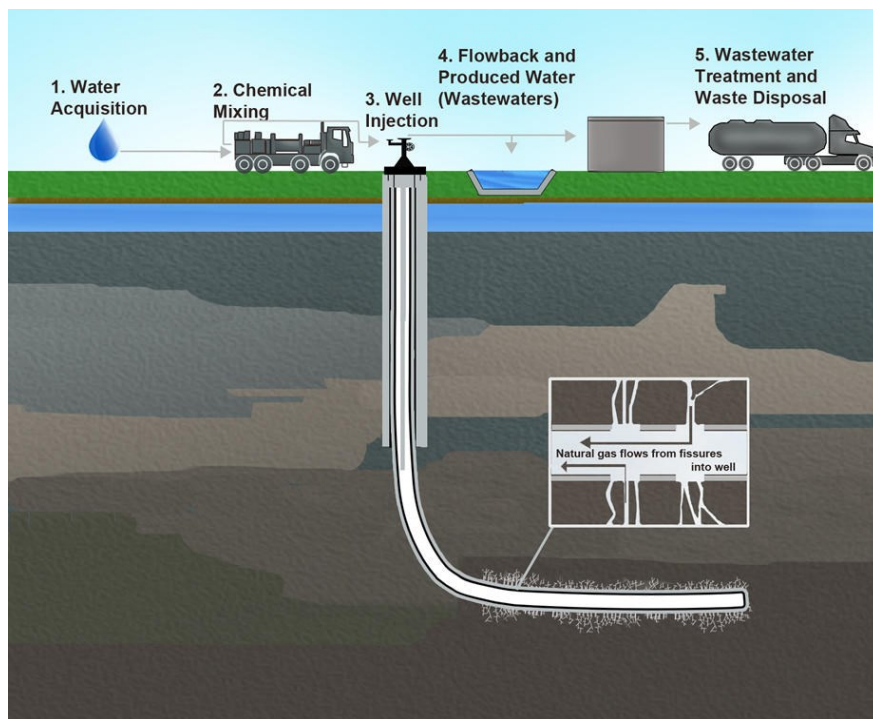


Figure 7 : Points clés de la fracturation hydraulique (28)

1.2 Le radon : caractéristiques et enjeux

1.2.1 Définitions et caractéristiques

Le radon est un gaz issu de la dégradation du radium, lui-même issu de la dégradation de l'uranium. Il a la particularité d'être invisible, incolore et inodore. Il s'agit d'un gaz naturel produit majoritairement dans les strates géologiques riches en radium, et qui est dilué dans l'air extérieur lorsqu'il remonte à la surface. Cependant, cette dissolution n'est pas toujours possible si la surface d'où le radon émerge est recouverte par une habitation. Dans ce cas, le gaz pénètre dans les pièces des habitations via des fissures, conduits d'eau ou tuyaux de gaz, et risque de voir sa concentration augmenter dans l'air intérieur en l'absence d'application d'une ventilation adéquate (11, 29, 30). On trouvera donc souvent une concentration de radon importante dans des pièces

telles que les sous-sols des habitations. La figure 8, issue du « Guide sur les mesures du radon dans les maisons », émis par Santé Canada, illustre la mobilité de ce gaz et sa capacité à traverser différentes matières pour pénétrer dans les habitations (29).

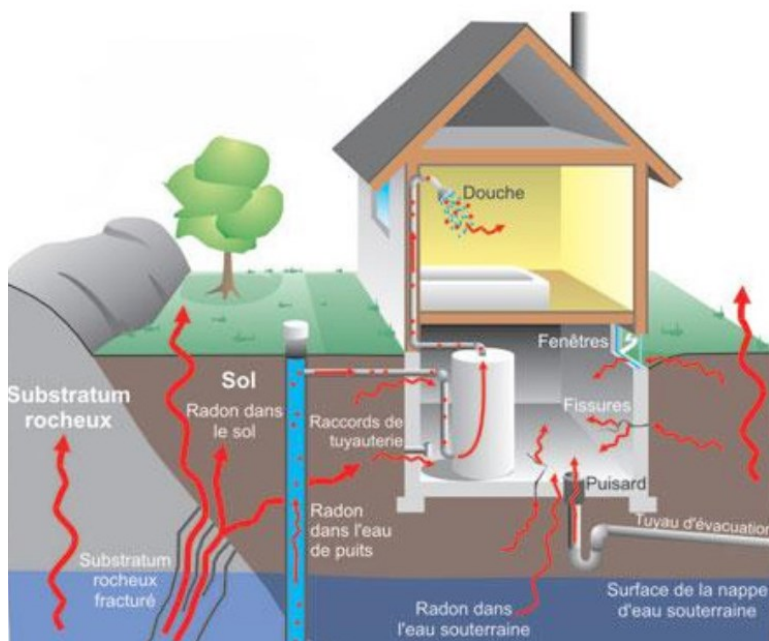


Figure 8 : Voies d'entrée du radon dans les bâtiments (29)

Il existe une ligne directrice propre au contrôle du radon dans les habitations. Le gouvernement du Canada estime depuis 2007 «[qu']il faut prendre des mesures correctives lorsque la concentration moyenne annuelle de radon dépasse les 200 Bq/m³ dans les aires normalement occupées d'un bâtiment » (29). Les recommandations canadiennes conseillent d'agir sur le niveau de radon dans les deux ans suivant la mesure de la concentration de radon, si celle-ci est entre 200 et 600 Bq/m³, et d'agir durant l'année suivant la mesure si celle-ci dépasse les 600 Bq/m³ annuels (29). Cette ligne directrice de 200 Bq/m³ établie en 2007 par le gouvernement canadien est venue remplacer la précédente norme établie en 1988 qui était de 800 Bq/m³ (31). La mesure du radon dans un bâtiment est possible grâce au positionnement d'un dosimètre dans les pièces de vie (c'est-à-dire occupées au moins 4 heures par jour par au moins une personne) et les pièces

les plus en contrebas. La mesure, réalisée idéalement sur une année, permet de définir la concentration moyenne en radon du logement en Bq/m³ (32, 33).

Le radon est largement présent au Canada. En effet, dans plusieurs régions du Canada, plus de 10 % des habitations présenteraient un niveau de radon supérieur à 200 Bq/m³, comme l'indique la figure 9 ci-dessous, provenant de Santé Canada, correspondant à des projections réalisées à partir de campagnes de mesures (34).

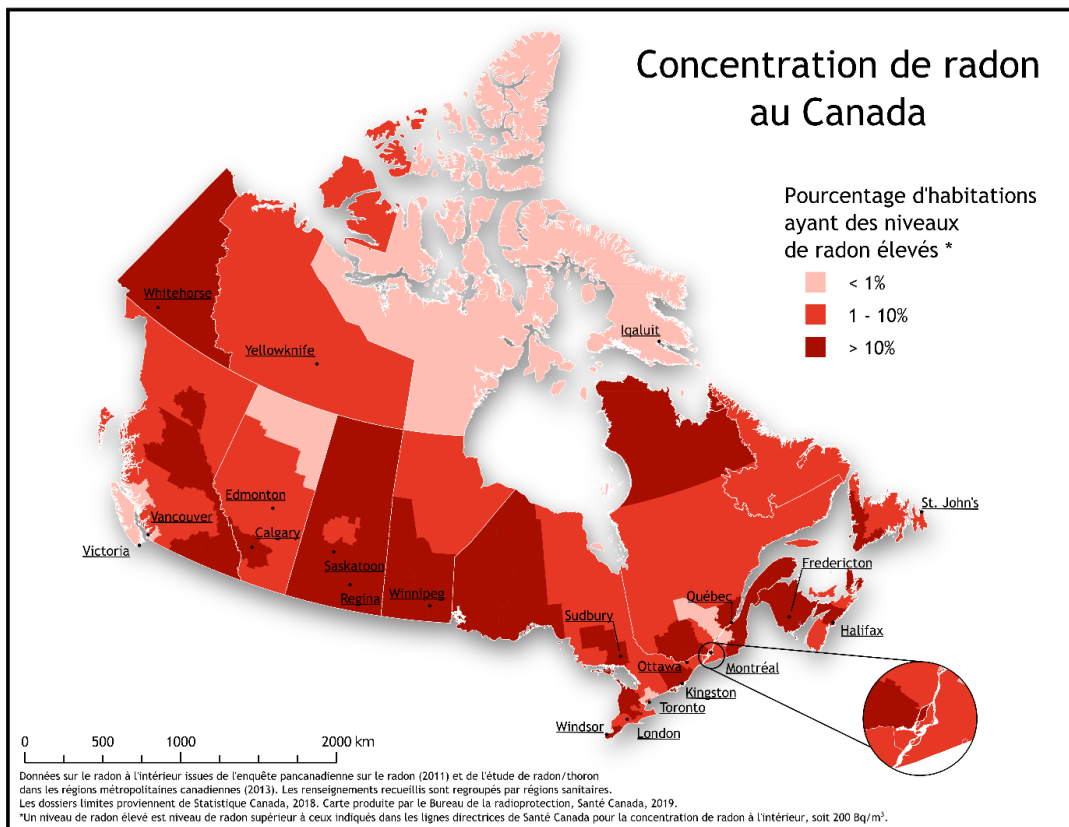


Figure 9 : Concentration de radon au Canada (34)

On peut remarquer sur cette cartographie que plusieurs provinces ou régions du Canada seraient concernées par un niveau de radon supérieur à 200 Bq/m³ dans plus de 10% des habitations (visibles en rouge foncé sur la Figure 9) (34). Ces principaux territoires sont :

- Yukon
- Région du Nunavik au Québec

- Moitié Sud du Manitoba
- L'Ouest de l'Ontario
- Nouveau Brunswick
- Nouvelle Ecosse
- Saskatchewan
- Région de Calgary en Alberta
- Une large zone en Colombie-Britannique comprenant principalement le sud, l'est et le centre de la province (34)

Il est néanmoins important de rappeler que ces projections comportent des limites et des incertitudes, et sont donc à utiliser avec prudence.

Dans le rapport final de « l'enquête pancanadienne sur les concentrations de radon dans les habitations » édité en 2012 par Santé Canada (31), une évaluation des niveaux radon dans chaque zone socio-sanitaire du Canada a été proposée. Cette investigation a tout d'abord permis de montrer que le radon est présent dans toutes les régions du Canada, sans exception. De toute évidence, les niveaux de radon dans les différentes régions diffèrent largement. En effet, le tableau 1 ci-dessous définit notamment le pourcentage, pondéré en fonction de la population, de canadiens habitant dans des logements où la concentration de radon est supérieure à la ligne directrice de 200 Bq/m³ (31). Sur l'ensemble du Canada, l'estimation du pourcentage de canadiens résidant dans des logements où la concentration de radon est supérieure à 200 Bq/m³ est de 6.9%, tandis que ce même pourcentage atteint 20.6% dans le New-Brunswick, 19.6% pour le Yukon, 19.4% pour le Manitoba, ou encore 15.7% pour la Saskatchewan (31).

Tableau 1 : Pourcentage pondéré en fonction de la population, de Canadiens habitant dans des maisons où la concentration de radon est inférieure à 200 Bq/m³, entre 200 et 600 Bq/m³, supérieure à 600 Bq/m³ et supérieure à 200 Bq/m³ par province ou territoire (31)

Province/Territoire	Pourcentage, pondéré en fonction de la population, de Canadiens habitant dans des maisons où la présence de radon a été détectée :			
	% Inférieure à 200 Bq/m³	% Entre 200 et 600 Bq/m³	% Supérieure à 600 Bq/m³	% Supérieure à 200 Bq/m³
AB	94,3	5,5	0,2	5,7
BC	96,1	3,4	0,5	3,9
MB	80,6	18,0	1,4	19,4
NB	79,4	15,2	5,4	20,6
NL	94,9	4,4	0,7	5,1
NS	89,3	8,2	2,5	10,7
NT	94,6	4,9	0,5	5,4
NU	100,0	0,0	0,0	0,0
ON	95,4	4,2	0,4	4,6
PE	96,5	3,5	0,0	3,5
QC	91,8	7,5	0,7	8,2
SK	84,3	14,4	1,3	15,7
YT	80,4	13,8	5,8	19,6

AB : Alberta ; BC : Colombie-Britannique ; MB : Manitoba ; NB : Nouveau-Brunswick ; NL : Terre-Neuve-et-Labrador ; NS : Nouvelle-Écosse ; NT : Territoires du Nord-Ouest ; NU : Nunavut ; ON : Ontario ; PE : Île-du-Prince-Édouard ; QC : Québec ; SK : Saskatchewan ; YT : Yukon

En Colombie-Britannique, ce rapport estime que 3.9% des habitants résident dans des logements où le niveau de radon est supérieur à 200 Bq/m³. Néanmoins, les données sont très variables entre les différentes régions socio-sanitaires de la province. En effet, d'après les données de pourcentages brutes des habitations ayant un niveau de radon supérieur à 200 Bq/m³, cinq régions socio-sanitaires présentent un résultat supérieur à 10%. Ces cinq régions sont : Nord Intérieur (12%), Okanagan (17.4%), Kootenay-Boudany (29.3%), East Kootenay (19%) et Nord-Est (10%) (31). Cette dernière région (Nord-Est) est le lieu de résidence des participantes de l'étude EXPERIVA, dans le secteur de la Peace River Valley (5). La figure 10 présente une carte interactive de la concentration de radon par région socio-sanitaire en Colombie-Britannique. Cette carte interactive a été réalisée par le British Columbia Centre for Disease Control (BCCDC), et

catégorise les concentrations de radon selon le 95^{ème} percentile, pour chaque région socio-sanitaire. Nous pouvons constater que, pour les trois régions du Nord-Est (Fort Nelson, Nord de la Peace River et Sud de la Peace River) le 95^{ème} percentile est entre 200 et 600 Bq/m³ (<https://bccdc.shinyapps.io/bcradonmap/>).

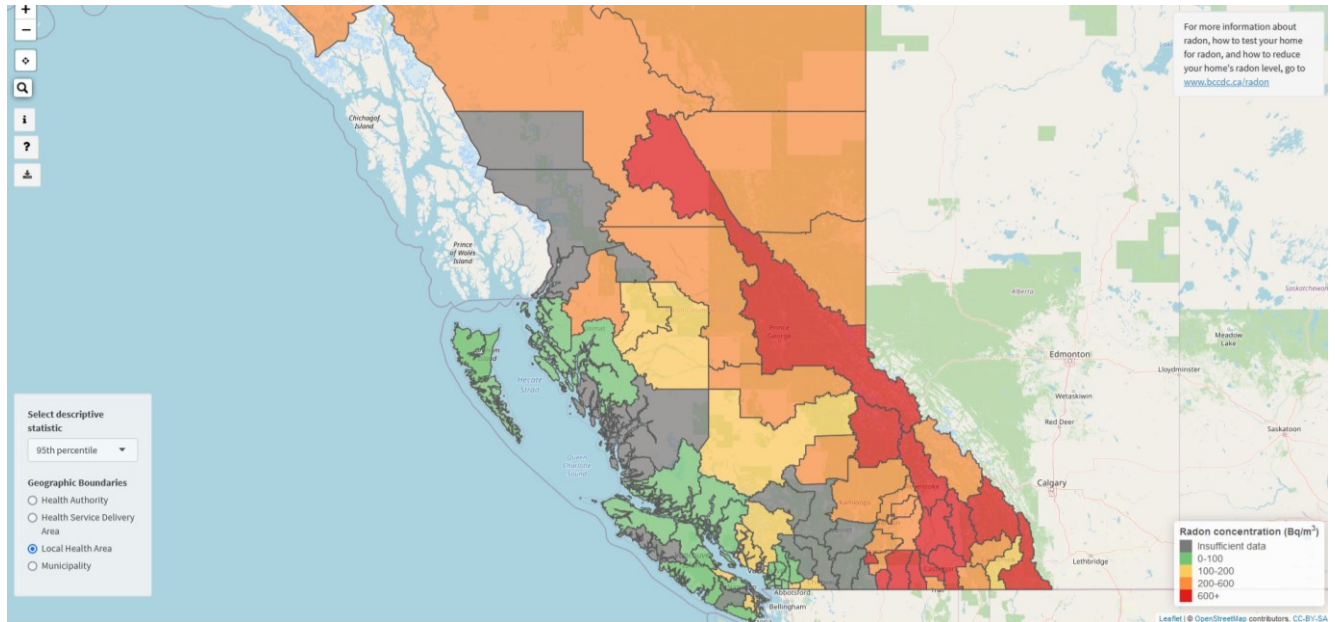


Figure 10 : Capture d'écran de la carte interactive du BCCDC. Concentration de radon dans les régions socio-sanitaires de Colombie-Britannique. 26 juillet 2022 (<https://bccdc.shinyapps.io/bcradonmap/>)

Nonobstant ces nombreuses données, Santé Canada reste prudent quant à leur utilisation. Il est en effet préférable de réaliser des tests dans le logement en question et de ne pas uniquement utiliser les données propres à la région socio-sanitaire concernée pour établir précisément un risque (31).

1.2.2 Les effets sur la santé du radon

Le radon est une préoccupation de santé publique mondiale, ayant amené l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) à réfléchir aux enjeux et solutions associés aux expositions humaine à ce gaz cancérigène (35). En 2016 au Canada, il était estimé que 3200 décès annuels étaient causés par une exposition au radon, soit quasiment le double des 1898 décès dus aux accidents de la route (36)

L'OMS et Santé Canada mettent en avant le risque de cancer du poumon associé à l'exposition au radon pour les populations (12, 35). En effet, radon est considéré comme la deuxième cause de cancer du poumon après le tabagisme. Cette association a pu être établie à partir d'études auprès des mineurs, mais également sur l'évaluation de l'air intérieur des habitations de la population générale (13). Le caractère cancérigène du radon sur les poumons émane de dommages affligés aux cellules pulmonaires suite à l'inhalation du gaz. En effet, le radon continue de se décomposer après inhalation dans les poumons, ce qui crée des particules radioactives et entraîne l'émission de rayonnements alpha. Ces derniers endommagent les cellules pulmonaires et accroissent le risque de cancer lors de la reproduction des cellules (12, 37). Des études ont mis en avant un risque de cancer, avec des localisations autres que pulmonaires, associé à l'exposition au radon (38), notamment une étude sur les expositions professionnelles au radon de mineurs en République Tchèque, présentant un excès de risque de développer une leucémie après l'exposition (35). Bien que pertinente et exploratoire, ces résultats sur la population professionnelle sont parfois difficilement généralisables à la population générale. L'exposition au radon pendant la grossesse a également été associée à certaines issues de naissance négatives. Par exemple, une récente étude sur une cohorte de 975 528 parturientes a dénoté une association entre les concentrations résidentielles de radon et une augmentation du risque d'hypertension artérielle durant la grossesse, cette étude a néanmoins été réalisée à partir de données de radon peu précises, c'est-à-dire que ces dernières correspondaient à des mesures de secteur

géographique (correspondant à un code postal), et non à des mesures réalisées à l'intérieur des habitations de chaque participante (39). L'hypertension artérielle durant la grossesse peut avoir plusieurs conséquences. Tout d'abord, la mère voit sa probabilité de développer une hypertension artérielle chronique augmenter (40). De plus, l'hypertension artérielle reste, par ses complications, la cause la plus fréquente de mortalité maternelle et fœtale (41). La littérature propre à l'exposition au radon chez les femmes enceintes n'est pas à ce jour très développée.

1.2.3 Le radon et la fracturation hydraulique

La présence de radon sur un territoire dépend tout d'abord des caractéristiques des sols et sous-sols. En effet, même si tout sol/sous-sol peut contenir du radon, on le retrouvera en plus grande quantité dans des formations géologiques volcaniques, granitiques ou sédimentaires (30, 42). En partant du postulat que la fracturation hydraulique libère différentes substances des roches en profondeur, on peut se questionner sur le devenir du radon présent dans ces formations géologiques. En effet, la fracturation hydraulique accentue-t-elle la libération et la remontée de radon vers la surface, et dans une certaine mesure, vers les habitations à proximité ? Il convient également de se questionner sur la distribution du radon sous cette hypothèse : celui-ci serait-il dispersé à la surface le long du tubage horizontal (plusieurs kilomètres), ou bien concentré autour du puits principal, suite à l'aspiration réalisée en fin de processus ? Des études ayant abordé ces questionnements ont permis de mettre en avant des relations entre le niveau de radon et la proximité de zones de fracturation hydraulique (8, 11).

Études portant sur des mesures de radon assemblées dans un contexte pré-exploitation pétrolière et gazière

Tout d'abord, avant de décliner les études ayant traité directement de la concentration de radon dans les territoires où la fracturation hydraulique est pratiquée, il paraît intéressant de présenter trois récentes études qui ont établi des concentrations de base de radon dans une zone

schisteuse sans exploitation de pétrole ou de gaz naturel. Ces données permettront dans l'avenir de comparer les concentrations de radon avant et après fracturation hydraulique si une telle pratique est mise en place. Deux études, réalisées respectivement en Afrique du Sud et en Australie, ont fait le choix de référencer les niveaux de radon dans l'eau en réalisant des analyses dans les puits artésiens de zones schisteuses (43, 44). En Afrique du Sud, Botha et al. (2019) ont mesuré des concentrations de radon dans l'eau du bassin Karoo, la moyenne de la concentration de radon mesurée était de 41 (36-46) Bq/L, soit 41 000 Bq/m³ (43). Dans la région de la Rivière Richmond en Australie, Atkins et al. (2016) ont également mesuré les concentrations de radon dans les eaux souterraines, les concentrations de radon des 91 échantillons variaient entre 0.14 et 20.33 Bq/L, soit 140 à 20 330 Bq/m³ (44). Au Royaume-Uni, dans le Nord du Yorkshire, des mesures référence de la concentration de radon dans l'air ont été réalisées dans une zone schisteuse. Daraktchieva et al. (2021) ont réalisé plus de 100 mesures en intérieur et 36 en extérieur réalisées par les services de santé publique anglais entre 2015 et 2019 (45). Les résultats mettent en avant des zones à faible risque radon (Kirby Misperton, Little Barugh et Yedingham), et des zones à risque radon plus important (Pickering et Malton) (45). Ces trois études représentent de futures données potentielles très intéressantes dans l'étude de la relation entre le radon et l'exploitation pétrolière et gazière en fournissant des concentrations de radon de base. Malheureusement, de telles concentrations de base n'ont pas été établies dans le Nord-Est de la Colombie-Britannique.

Études traitant de la concentration de radon dans l'air extérieur à proximité de zones d'exploitations pétrolières et gazières non conventionnelles

Des études ont été réalisées sur les concentrations de radon mesurées sur les sites d'exploitation de gaz naturel par fracturation hydraulique. Des chercheurs de l'Université du Colorado ont mesuré la concentration de radon dans l'air extérieur à proximité d'un puits de forage. Grâce à 4

mesures de 1 heure minimum, réalisés à partir d'un capteur sur le toit du véhicule , ils ont pu obtenir et analyser les concentrations de radon pendant quatre processus différents sur un même site de fracturation hydraulique: avant la fracturation, pendant la fracturation, après la fracturation et pendant que les fissures sont toujours maintenues en tension par les produits en place, et pendant le reflux (10). La concentration avant fracturation était de 55.5 Bq/m³, suivie d'une concentration de radon augmentant à 111 Bq/m³ pendant la fracturation et maintenue à cette concentration durant la mise en tension et le reflux (10). Cette étude suggère que les concentrations extérieures de radon autour d'un puits de forage peuvent augmenter en raison de la fracturation hydraulique. Néanmoins, il convient de préciser qu'une seule mesure a été réalisée pour chaque processus, durant une courte durée, et qu'il n'y a pas de comparaison avec d'autres puits du secteur.

En 2013, L'Université Southern Cross en Australie a abordé les concentrations de radon en extérieur autour de zones de fracturation hydraulique, en mesurant ces concentrations à cinq emplacements de distances différentes du puits, sur une durée de 24 heures (9). Trois capteurs ont été déposés à l'intérieur de la zone d'exploitation à une hauteur de 2 mètres (avec une distance du puits le plus proche de 60m, 250m et 500m), et deux capteurs ont été déposés à l'extérieur de la zone (avec une distance du puits le plus proche de 1500 et 4400 m). Les résultats mettent en avant une augmentation globale de la concentration de radon durant la nuit (probablement entraînée par une inversion thermique), ainsi qu'une association significative positive entre la concentration de radon et le nombre de puits dans un périmètre de 3 km (9). Les autres données collectées (dont la concentration de radon moyenne) ne permettent pas de mettre en avant de différences significatives en terme de concentration de radon entre les différents emplacements et le point de contrôle (ce dernier étant à 4400 mètres du puits le plus proche) (9).

Finalement, en 2020, une équipe de la Harvard T.H. Chan School of Public Health a mis en évidence une augmentation de la concentration extérieure de radon dans les zones présentant

plus de 100 puits de fracturation hydraulique dans un rayon de 20 km. Ces calculs ont pu être réalisés à partir des mesures radon effectuées par l'agence de protection de l'environnement des États-Unis (*Environment Protection Agency*, ou EPA) sur le territoire américain, dans le cadre du programme RadNet (46). Néanmoins, il est important de rappeler que chaque étude et chacun des résultats sont également tributaires de la géologie locale, ainsi une généralisation ou comparaison avec d'autres régions doit être effectuée avec prudence.

Études traitant de la concentration de radon dans l'air intérieur à proximité de zones d'exploitation pétrolières et gazières non conventionnelles

Plusieurs chercheurs se sont concentrés sur les mesures de radon à l'intérieur des logements à proximité de sites d'exploitation pétrolière et gazière associée à de la fracturation hydraulique. À partir de plus de 800 000 données de mesures de radon effectuées entre 1989 et 2013 dans l'état de la Pennsylvanie, une équipe de la Johns Hopkins Bloomberg School of Public Health a pu analyser l'association entre la concentration de radon intérieure et la présence de fracturation hydraulique dans le secteur de la formation Marcellus. Seuls les puits d'exploitations non conventionnels étaient inclus dans l'étude (8). Leurs résultats, notamment obtenus grâce à une analyse de régression, ont pu mettre en avant une stagnation des concentrations de radon entre 1987 et 2003, suivie d'une augmentation notable de 2004 à 2012, notamment dans les cantons avec plus de 100 puits de fracturation hydraulique. Cette augmentation était mise en relation dans l'article avec un important développement de la fracturation hydraulique sur la formation Marcellus lors de cette seconde période (plus de 7000 puits forés entre 2005 et 2013 (8)). Aussi, une association était retrouvée entre le nombre de puits et la concentration de radon durant l'été, chaque puits supplémentaire dans un périmètre de 1 km autour du logement était associé à une augmentation de la concentration de radon de 1% pour les mesures en sous-sol et de 2.8% pour les mesures au rez-de-chaussée (8). Néanmoins, il existait peu d'informations dans l'étude sur

les types de construction des bâtiments, et le type de ventilation. Aussi, il n'est pas abordé la possibilité d'influence du radon dégazé en provenance de l'eau de consommation, et qui pourrait apporter une explication à la plus grande augmentation de la concentration de radon dans l'air des rez-de-chaussée vis-à-vis des sous-sols. Il aurait également pu être intéressant d'inclure les données sur les travaux réalisés dans les habitations. En effet, des travaux d'étanchéité et d'isolation dans un bâtiment peuvent avoir une influence sur les concentrations de radon, soit en augmentant les concentrations par diminution des échanges d'air entre l'intérieur et l'extérieur, soit en réduisant les concentrations en limitant l'entrée du radon présent dans le sol (8).

C'est à partir de cette même base de données que Black et al. (2019) (47) ont abordé cette thématique, en retirant les données liées aux puits non conventionnels verticaux, et en développant quatre modèles de calcul différents (47). Il n'apparaît pas le nombre de puits non conventionnels verticaux retirés de l'étude, il pourrait être intéressant néanmoins de se questionner sur ce nombre, au vu de la rentabilité potentiellement largement inférieure de tels puits (14, 47). Leurs résultats et conclusions furent différents de ceux cités plus haut, puisqu'ils ont mis en avant une absence de relation significative entre la distance d'un puits de fracturation hydraulique et la concentration en radon. De plus, ils ont souligné une limite importante dans les études sur les concentrations de radon : la non connaissance des concentrations intérieures de radon avant l'exploitation (47). En effet, le radon est présent en quantité plus importante dans les sols schisteux et granitiques : il paraît donc logique de trouver des concentrations importantes dans des zones propices à la fracturation hydraulique. C'est un argument supplémentaire pour réaliser des études établissant des concentrations de base, comme celles citées précédemment, afin de comparer les concentrations avant et après l'exploitation pétrolière et gazière (43-45). L'étude de Black et al. (2019), bien que mobilisant différents modèles et approches, réalise une inclusion plus large des données de radon vis-à-vis de l'approche de Casey et al. (2015). Par exemple, Casey et al. (2015) avaient fait le choix d'exclure les données de 1987 et 1988, car peu nombreuses (et

potentiellement plus difficilement comparables avec les autres périodes si l'effectif est beaucoup plus faible), tandis que Black et al. (2019) ont inclut ces données (8, 47).

Le radon s'introduit dans les logements par infiltration depuis le sol, mais il peut également être transporté par pipeline avec le gaz naturel, lorsque ce dernier représente la source de chauffage et de cuisine d'une habitation (48). C'est à partir de cette dernière source d'exposition qu'une équipe de la Carnegie Mellon University à Pittsburg a recherché la relation entre les cancers du poumon liés au radon et la présence de radon dans le gaz naturel utilisé pour le chauffage et la cuisine (48). Des prélèvements de gaz naturel ont été effectués au niveau du pipeline de 7 zones d'exploitation gazière (immédiatement après récupération du gaz naturel par le puit de forage) et ont mis en avant des concentrations de radon supérieures à 1000 Bq/m³. La demi-vie du radon étant de 3.8 jours, et la durée d'acheminement du gaz naturel dans le secteur étudié de la formation Marcellus étant de 0.5 à 6 jours, il est donc possible d'émettre l'hypothèse de concentrations de radon importantes dans les foyers. Néanmoins, la concentration moyenne de radon estimée par les 10 000 prévisions était de 0.5 Bq/m³ attribuable à la cuisine et de 0.6 Bq/m³ attribuable au chauffage. Ces concentrations correspondent à la concentration de radon qui serait attribuable uniquement à ces activités (et non la concentration globale d'un logement). Dans cette étude, il semble peu probable que l'utilisation du gaz naturel de la formation Marcellus pour le chauffage et la cuisine entraîne une augmentation des cas de cancer du poumon (48). Il est néanmoins important de préciser que cette étude ne prend en compte que le radon estimé provenant des activités de chauffage et de cuisine, et qu'il n'a pas été possible d'établir la concentration exacte à laquelle sont exposés les participants. Il était notamment difficile d'évaluer l'exposition au radon lors de l'utilisation du gaz naturel pour la cuisine, qui représente une distance très faible entre l'individu et le point d'émission du gaz (gazinière par exemple) (48).

Traitée dans plusieurs des précédentes études, la formation Marcellus est un secteur riche en roche de schiste et donc propice à l'exploitation de gaz naturel par fracturation hydraulique. Une

étude de l'Université de Toledo s'est concentrée sur la partie de cette formation présente dans l'état d'Ohio (11). À partir de 118 421 tests de radon effectués entre 2007 et 2014 et d'une modélisation à plusieurs niveaux, une corrélation négative significative entre la distance d'un puits et la concentration intérieure de radon a été identifiée. De plus, les auteurs présentent que la concentration moyenne de radon dans les maisons testées (5.4 pCi/l, soit environ 199 Bq/m³) était supérieure à la concentration limite à partir de laquelle l'EPA recommande des réparations dans les logements (4 pCi/l soit environ 150 Bq/m³), et à la concentration de référence pour minimiser les risques sur la santé de l'OMS (2.7 pCi/l soit environ 100 Bq/m³) (11).

Ces différentes études ne permettent pas de préciser la relation exacte entre la fracturation hydraulique et la concentration de radon en milieu intérieur. Néanmoins, elles éveillent des questionnements et de l'intérêt de réaliser de nouvelles études dans ce domaine. La surveillance des secteurs ayant bénéficié d'une étude de référence avant fracturation est particulièrement intéressante pour l'avenir.

1.3 Présentation de l'étude EXPERIVA, et objectifs du travail sur le radon

1.3.1 Présentation de l'étude EXPERIVA

Le Nord-Est de la Colombie-Britannique, situé sur la formation Montney, contient de nombreux sites d'exploitation pétrolière et gazière, pouvant être associé à de la fracturation hydraulique (20). L'étude EXPERIVA a été réalisée dans cette région (49). Comme abordé précédemment, la fracturation hydraulique peut entraîner une libération dans l'air de contaminants, ce qui peut poser un risque pour la santé des populations vivant à proximité. L'étude EXPERIVA traite du risque associé à ces contaminants auprès des femmes enceintes résidant dans la région. Afin de diversifier et renforcer les analyses, les contaminants étudiés sont nombreux (composés organiques volatiles, éléments traces, radon) (49). Caron-Beaudoin et al. (2022) ont retrouvé la présence de plusieurs composés organiques volatiles dans l'air et dans l'eau du robinet des participantes, ainsi qu'une association positive entre la proximité et densité de zones d'exploitation pétrolière et gazière (conventionnelles et non conventionnelles) et la concentration de plusieurs contaminants : chloroforme, acétone, benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes dans l'air, et trihalométhanes dans l'eau (49).

Précédant EXPERIVA, une étude pilote réalisée en 2016 à partir de prélèvements d'urine et de cheveux de 29 parturientes a permis de mettre en avant la présence de manganèse dans des concentrations supérieures à celles établies par l'Enquête Canadienne sur les Mesures de Santé (ECMS), qui collecte et regroupe les données sur la santé des Canadiens (6, 50). Les concentrations de barium, d'aluminium et de strontium dans l'échantillon étaient également plus importantes que dans une population référence (6). Concernant les composés organiques volatils, il a été retrouvé une concentration d'acide trans, trans muconique urinaire, métabolite non-spécifique du benzène, plus importante que dans la population de référence de l'ECMS (5).

Néanmoins, cette étude pilote ne permet pas de généraliser ces données, au vu du nombre de participantes et de l'impossibilité d'attribuer ces expositions à la fracturation hydraulique (5, 6).

Un travail rétrospectif a été également réalisé à partir des données des naissances à l'hôpital de Fort St John situé dans le Nord-Est de la Colombie-Britannique entre le 30 décembre 2006 et le 29 décembre 2016. L'objectif était l'évaluation de la relation entre la proximité des puits de forage et certaines caractéristiques et complications liées à la naissance (51). Les résultats ont pu mettre en avant des associations entre la densité/proximité de puits de pétrole et de gaz et une diminution du poids à la naissance, ainsi qu'une augmentation du risque de naissance prématurée. Néanmoins, ces associations ne suivaient pas une relation linéaire (51). Ce travail était le premier de ce type pour le Canada et a permis de compléter les réflexions actuelles et futures dans ce domaine (51). Il est important de souligner que cette étude était basée sur une unique région géographique, limitant sa généralisation à plus grande échelle. De plus, l'inclusion des puits dans l'étude ne prenait pas en compte le stade d'exploitation (p. ex. forage, fracturation) (51).

1.3.2 Objectifs du travail sur le radon

Cette réflexion sur la littérature associée aux exploitations de gaz naturel, au radon et aux impacts sanitaires et environnementaux, met en avant que la proximité d'une zone de forage pourrait augmenter le risque sanitaire des populations. Néanmoins, les données scientifiques propres au radon dans ce domaine sont à ce jour trop peu nombreuses pour mettre en avant une relation claire entre ces variables. Ceci est notamment le cas au Canada, où à ce jour il ne semble pas exister d'études au sujet de l'association entre le radon présent dans les logements et l'exploitation gazière et pétrolière.

L'objectif de ce travail était donc d'analyser l'association entre les concentrations de radon dans l'air intérieur des foyers du Nord-Est de la Colombie-Britannique et la densité et proximité des puits de pétrole et de gaz naturel, exploités, entre autres, par fracturation hydraulique. Ce travail,

unique à ce jour au Canada et en Colombie-Britannique, s'inscrit pleinement dans l'étude EXPERIVA et les résultats qu'elle a déjà pu mettre en avant dans la région de la Peace River Valley.

2. Méthodes

2.1 Obtention d'une base de données radon

Afin d'aborder ce travail de recherche, une base de données a été créée comprenant, notamment, des concentrations de radon en milieu intérieur issues de différentes études et campagnes de mesures réalisées dans la région. Nous avons développé cette base de données à partir d'un partage de données de mesures radon provenant de l'étude EXPERIVA et du BCCDC.

2.1.1 Mesures de radon dans l'étude EXPERIVA

Dans l'étude EXPERIVA, une cohorte de femmes enceintes a été recrutée lors de leur visite prénatale auprès de leur médecin ou sage-femme. Les femmes enceintes éligibles et intéressées par l'étude rencontraient ensuite un membre de l'équipe de recherche afin de présenter les différentes analyses et de proposer un questionnaire sur les données physiques (taille, poids, semaines de grossesse), socio-démographiques, et liées à l'habitat (49). Dans ce cadre, des détecteurs de radon ont été placés pendant une période de 3 à 12 mois chez les 85 participantes à l'étude. Afin de refléter au mieux l'exposition au radon des participantes, il a été demandé d'installer le détecteur de radon dans la pièce la plus utilisée du logement et située à l'étage le plus bas de la maison. Il est ensuite demandé à ce que le détecteur ne soit plus mobilisé pendant la durée de la mesure. À la fin de la mesure, les détecteurs furent acheminés dans une enveloppe préaffranchie vers un centre d'analyse (laboratoire AccuStar) par les participantes. Néanmoins, 41 mesures étaient impossibles à analyser (détecteur cassé, déménagement, oubli, ou autre), ne permettant de récupérer que 44 résultats. Ces 44 résultats furent associés à la base de données regroupant les résultats de l'étude EXPERIVA. Un travail statistique sur ces 44 données est limité et ne permettrait pas d'explorer pleinement l'association entre les concentrations de radon et la densité et proximité de zone d'exploitation pétrolière ou gazière (conventionnelle et non-conventionnelle) dans la région.

2.1.2 Mesures de radon par le BCCDC

Afin de bénéficier d'un échantillon plus important, une recherche d'études et de données sur le radon en Colombie-Britannique fut réalisée. À la suite d'échanges avec le département radon de Santé Canada et le BCCDC, nous avons eu accès à une base de données radon mise au point par le BCCDC et nommée *British Columbia Radon Data Repository* (BCRDR). Cette dernière regroupe les mesures de radon réalisées par différents intervenants (incluant les données de l'enquête pancanadienne sur le radon de Santé Canada (31)) depuis les années 1990. Cette vaste base de données regroupe un nombre important de données sur la province. Pour la région du Nord-Est, correspondant à la région de l'étude EXPERIVA, plus de 400 données radon étaient disponibles. Cette augmentation de la taille de l'échantillon a permis une analyse et une puissance statistique plus conséquente, ainsi qu'une collaboration avec les services du BCCDC. Afin de bénéficier de la base de données BCRDR, une demande auprès du comité d'éthique de l'École de Santé publique de l'Université de Montréal (ESPUM) a été réalisée. À ce titre, il est demandé par le BCCDC que les coordonnées GPS des participants soit modifiées par une erreur aléatoire de 0 à 500 mètres, afin de rendre toute identification impossible. Suite à la réception de la base de données, certaines coordonnées GPS de participants ($n = 44$) n'étaient pas disponibles dans la base de données au vu de l'impossibilité de mettre en place l'erreur aléatoire (dans ces cas, les participants n'avaient pas de voisins assez proches pour appliquer l'erreur aléatoire et empêcher une identification). La base de données BCRDR a été mise en commun avec les 44 mesures de l'étude EXPERIVA, pour atteindre un total de 497 données. La figure 11 ci-dessous illustre les différentes étapes de la réalisation de la base de données finale.

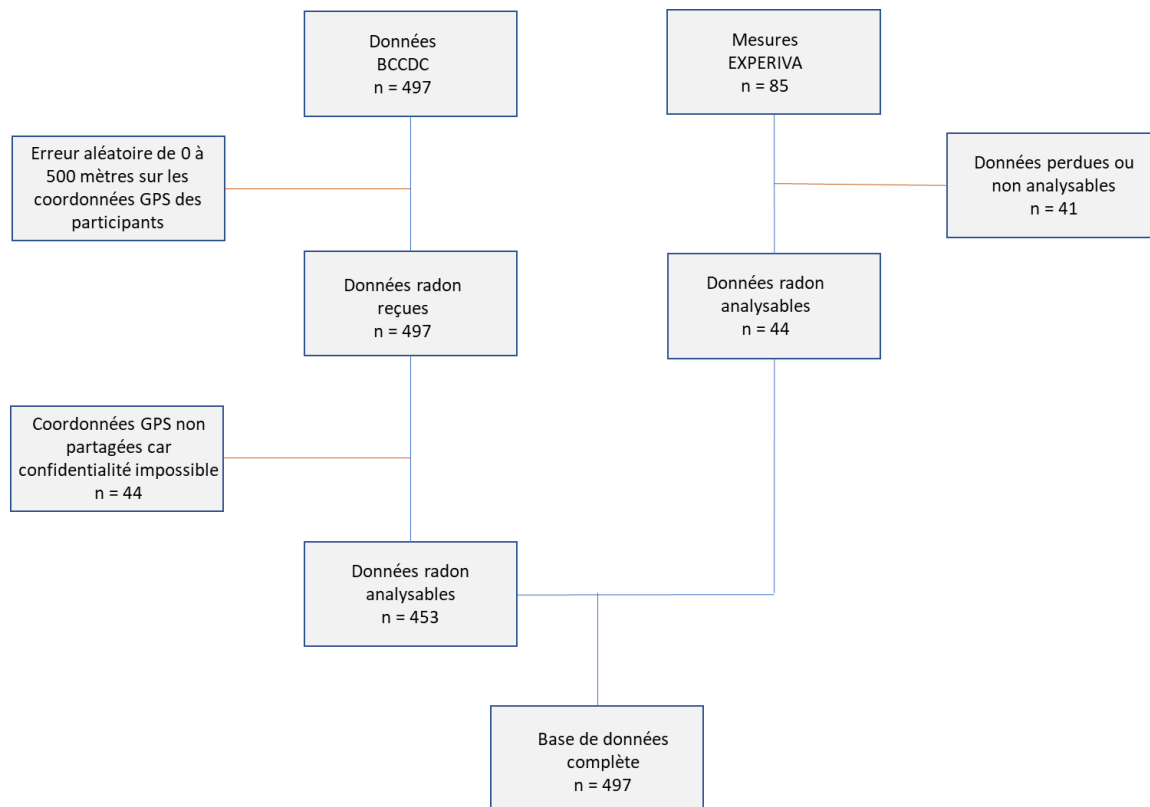


Figure 11 : Étapes de la réalisation de la base de données finale

La base de données ainsi développée comprenait les coordonnées GPS des résidences, la concentration de radon dans la maison et l'année de début de la mesure radon. Pour la plupart des données, nous disposions également de l'étage de la mesure, des dates de début et de fin de la mesure et de la région socio-sanitaire où se trouvait la résidence. La période de construction n'était connue que pour 230 unités, et déclinée par période (1946 à 1960; 1961 à 1970; 1971 à 1980; 1981 à 1990; 1991 à 2000 et 2001 à 2010). La majorité (n=282) des mesures de radon ont été réalisées grâce à l'appareil de mesure AccuStarCanada Alpha Track, l'appareil de mesure utilisé était inconnu pour 215 données.

2.2 Analyses statistiques

2.2.1 Analyse générale des niveaux de radon et selon l'étage

Après récupération de l'ensemble des données radon disponibles (EXPERIVA et BCRDR), les mesures de radon inférieures à la limite de détection ($n=24$) furent modifiées. La limite de détection étant de 15 Bq/m^3 dans nos études, les concentrations de radon sous la limite de détection ont été remplacées par $\frac{15}{\sqrt{2}}$, soit 10.61, arrondi à 11 Bq/m^3 (en accord avec les services d'épidémiologie du BCCDC). Ensuite, une analyse des données a été réalisée avec le logiciel R (4.2.1). Des premières analyses descriptives ont permis de caractériser la distribution des concentrations de radon dans l'échantillon, ainsi que de calculer la médiane, moyenne et l'écart type de la distribution. Aussi, le calcul de la proportion de logement de l'échantillon présentant une concentration supérieure à la ligne directrice canadienne, c'est-à-dire $>200 \text{ Bq/m}^3$, a été réalisé. Cette dernière donnée a permis une estimation de la proportion des logements de l'échantillon pour lesquels une intervention est recommandée par Santé Canada (29). Aussi, au vu des caractéristiques du radon et des points d'entrées dans l'habitation, une comparaison a été réalisée entre les mesures réalisées au sous-sol et les mesures réalisées au rez-de-chaussée ou à un autre étage à partir d'un test T de student (36). L'hypothèse est que la concentration de radon serait plus importante dans le sous-sol. En effet, la ventilation moins efficace des pièces du sous-sol, ainsi que la pénétration du radon plus importante dans ces mêmes pièces par fissures ou par les circuits de tuyauteries, laissent imaginer qu'une concentration plus importante pourrait être retrouvée (29). Néanmoins, cette hypothèse ne prend pas compte la concentration de radon de l'eau souterraine, ces concentrations pouvant varier largement et devenir une source significative (52, 53). Certaines données d'étages n'étaient pas disponibles dans la base de données ($n=59$). Dans ces 59 données, 44 correspondent à des études où les participants avaient reçu la consigne

de disposer le capteur dans la pièce la plus basse du logement. Il a été choisi de réaliser une imputation sur les données d'étages manquantes, en les caractérisant comme sous-sol.

2.2.2 Estimation de la densité et proximité des puits de pétrole et de gaz naturel par la méthode IDW

Pour estimer la densité et proximité des puits de pétrole et de gaz naturel autour des habitations des participants, nous avons utilisé l'approche Inverse Distance Weighting (IDW). Ne bénéficiant pas d'information sur les types de puits (conventionnels ou non conventionnels), la nature de ces derniers n'est pas considérée dans l'analyse. Cette méthode d'interpolation prend en compte, pour chacune des habitations considérées, la distance entre chaque puits présent dans le Nord-Est de la Colombie-Britannique et l'habitation, ainsi que du nombre de puits dans un périmètre défini autour de cette même habitation. Trois périmètres ont été choisis, soit 2.5 km, 5 km et 10 km. La cartographie des puits dans la région est possible grâce aux données de la *British Columbia Oil and Gas Commission*. Dans un premier temps, les coordonnées GPS des participants et des puits ont été visualisées dans le logiciel de cartographie QGIS (Desktop 3.26.1). Ainsi, ce dernier permet de calculer, pour chaque point représentant le logement d'un participant, la distance avec tous les puits de la base de données dans chaque périmètre. Dans un second temps, cette matrice de distance a été travaillée grâce au logiciel R. Afin d'encadrer dans le temps les puits inclus dans le modèle, et éviter d'inclure des puits ayant été exploités après la période de mesure d'un logement, les périodes d'inclusions sont spécifiées dans le code R. Pour le modèle principal, seuls les puits dont la date de forage est antérieure à la date de fin de la mesure radon ont été inclus, évitant d'inclure des puits forés après la fenêtre de mesure. Le calcul des IDW a ensuite été réalisé pour chaque résidence : les résultats de $1/(\text{distance entre puits et résidence})$ ont été additionnés pour tous les puits présents dans le périmètre choisi et répondant à la condition temporelle. L'équation de calcul des IDW est similaire à celle déjà utilisée

dans d'autres études de notre groupe de recherche (49, 51) : $IDW_x = \sum_{i=1}^n (\frac{1}{d_i})$, où X est le périmètre utilisé (10, 5 ou 2.5 km), i correspond à un puits dans ce périmètre, di la distance entre le logement et le puits en question, et n le nombre de puits à l'intérieur du périmètre (51).

Aussi, les trois périmètres ont été traités séparément, permettant de récupérer trois bases de données d'IDW. La densité a également été calculée par le nombre de puits répondant à la condition temporelle dans chaque périmètre. Les données de l'étude réalisée en 1992 ne permettaient pas de connaître précisément la date de début et de fin des mesures de radon, il a donc été décidé d'imputer ces données en établissant au 01/01/1992 la date de début et au 31/12/1992 la date de fin de la mesure.

2.2.3 Analyses de régression

Modèle principal

L'ensemble des analyses statistiques décrites ont été réalisées avec le logiciel R (4.2.1).

Dans l'analyse et la recherche d'une éventuelle association entre la densité/proximité des zones d'exploitation pétrolière et gazière et la concentration de radon à l'intérieur des logements, une régression linéaire multiple a été réalisée, avec ajustement selon l'étage de la résidence dans laquelle la mesure de radon a été effectuée. La section « étage » de la base de données reçoit donc la valeur 0 dans le cas d'une mesure dans le sous-sol, et la valeur 1 pour tout autre étage.

Les concentrations de radon ont été transformées en logarithme naturel afin de tendre vers une normalisation de la distribution et limiter une hétéroscédasticité dans les résidus des régressions.

Aussi, afin de réaliser des comparaisons dans les différentes bases de données initiales, il a été choisi de réaliser une régression à partir de l'échantillon global, ainsi qu'une régression pour chaque sous-groupe correspondant à une étude initiale (avant le regroupement des bases de données). Nous bénéficions donc de 4 sous-groupes pour effectuer cette analyse. Le premier

groupe correspond à l'étude EXPERIVA (2019-2020), le deuxième groupe (2014-2017), le troisième groupe (1992), et le quatrième groupe (2009-2013) sont issus de la base de données regroupées BCRDR, réalisée par le BCCDC à partir de différentes études sources.

Afin de proposer une interprétation plus intuitive des résultats des régressions réalisées, nous avons converti les pentes obtenues en pourcentage de changement par incrément de densité/proximité des puits à partir de l'équation suivante : $100 \times (e^{\beta_1} - 1)$, où β_1 correspond à la pente obtenue par analyse de régression où les concentrations de radon étaient ln-transformées (54).

Analyses exploratoires

L'utilisation de la technique du plus proche voisin pour déterminer les liens entre le radon et les puits de fracturation hydraulique est utilisée dans l'étude de Xu et al. (11). Suite à la mise en place d'une erreur aléatoire sur les coordonnées GPS (de 0 à 500 mètres) de nos données, afin d'assurer la confidentialité des participants, cette approche est difficile en première intention dans notre étude. Néanmoins, une analyse à partir du puits le plus proche est réalisée à titre exploratoire.

Notre base de données globale présente des secteurs géographiques différents dans les différentes études. Il est donc difficile de réaliser une comparaison entre avant et après 2007, année correspondant à l'augmentation massive du nombre d'exploitations non-conventionnelles (20). Néanmoins, les villes de Fort St John et Fort Nelson sont représentées dans toutes les études, nous avons donc pu, à titre exploratoire, explorer l'évolution des concentrations de radon dans le temps à partir d'un sous-groupe réunissant ces deux villes.

3. Article

CONTRIBUTION DES AUTEURS

Emmanuel Bourdet :

- Ensemble du travail réalisé sous la supervision et avec la collaboration du directeur et de la directrice de mémoire, Marc-André Verner et Élyse Caron-Beaudoin;
- Récupération des bases de données auprès du BCCDC et du Professeur Élyse Caron-Beaudoin;
- Réalisation du calcul des IDW et du nombre de puits pour chaque périmètre à partir du logiciel QGIS (Desktop 3.26.1) et des précédents travaux du Professeur Élyse Caron-Beaudoin;
- Analyse des données radon à l'aide du logiciel R (4.2.1);
- Ecriture de l'article scientifique en anglais, avec l'aide et la révision des co-auteurs.

Marc-André Verner :

- Elaboration et mise en œuvre du projet de recherche
- Soutien sur la méthodologie, l'analyse des données et la rédaction
- Révision de diverses versions de l'article
- Supervision du travail

Élyse Caron-Beaudoin :

- Elaboration et mise en œuvre du projet de recherche
- Soutien sur la méthodologie, l'analyse des données et la rédaction
- Révision de diverses versions de l'article
- Supervision du travail

- Partage des bases de données EXPERIVA, et du registre des puits en Colombie-Britannique

Vikki Ho :

- Soutien pour l'approche épidémiologique : méthodologie, choix des tests statistiques, interprétation des résultats;
- Révision de l'article.

Jeffrey Trieu :

- Responsable de la création et de la gestion de la base de données BCRDR au BCCDC;
- Partage de la base de données BCRDR;
- Révision de l'article.

Density/proximity of oil and gas wells in Northeastern British Columbia (Canada) and indoor air radon concentrations

Emmanuel Bourdet^{1,2}, Vikki Ho^{3,4}, Jeffrey Trieu⁵, Élyse Caron-Beaudoin^{6,7}, Marc-André Verner^{1,2}

- 1- Department of Occupational and Environmental Health, School of Public Health, Université de Montréal
- 2- Centre de Recherche en Santé Publique, Université de Montréal and CIUSSS du Centre-Sud-de-l'Île-de-Montréal
- 3- Carrefour de l'innovation, Centre de recherche du CHUM (CRCHUM), Montréal, Québec, Canada
- 4- Département de médecine sociale et préventive, Université de Montréal, Montréal, Québec, Canada
- 5- Environmental Health Services, British Columbia Centre for Disease Control
- 6- Department of Health and Society, University of Toronto Scarborough
- 7- Department of Physical and Environmental Sciences, University of Toronto Scarborough

Corresponding author:

Marc Andre Verner

Department of Environmental and Occupational Health

Université de Montréal

Pavillon Marguerite d'Youville

2375 chemin de la Côte-Sainte-Catherine, Suite 4105

E-mail : marc-andre.verner.1@umontreal.ca

Telephone: (514) 343-6465

3.1 Abstract

Background: Oil and gas extraction activities can emit contaminants, including radon, but studies on indoor air contaminants in regions of oil and gas exploitation are scarce.

Objective: This study aimed to evaluate the association between the density/proximity of oil and gas wells and indoor air radon concentrations in Northeastern British Columbia.

Methods: Data from the *British Columbia Radon Data Repository* (BCRDR) and the Exposures in the Peace River Valley study (EXPERIVA) were used, with 497 radon measurements taken from dwellings between 1992 and 2019. Within different buffer zones around each dwelling (2.5, 5 and 10 km), well density was calculated and an exposure metric, Inverse Distance Weighting (IDW), of both well density and proximity was derived. Linear regression models were used to evaluate the associations between well density and IDW and indoor air radon concentrations while adjusting for the floor where measurement was taken.

Results: A higher radon concentration was measured in basements than upper floors. Statistically significant and negative associations ($p < 0.05$) were observed between well density/proximity and radon concentrations. For example, an increase of one well within 10 km was associated with a modest decrease of 0.1% (95% CI: 0.05; 0.20) in radon concentrations. We observed no positive association between well density/proximity measurements and radon concentrations. The negative associations were primarily influenced by radon measurements made in 1992, when oil and gas development used very little hydraulic fracturing.

Conclusion: Additional studies with more measurements, information on dwelling type, and phase of oil and gas operations could allow a more precise and powerful analysis.

Keywords : Radon, gas development, exposure science, IDW

3.2 Introduction

Northeastern British Columbia (Canada) is a region of oil and gas exploitation, namely through unconventional methods like hydraulic fracturing. (1, 14-16). Hydraulic fracturing allows the exploitation of oil and gas sequestered in tight reservoirs and shale resources (15). Hydraulic fracturing consists of several steps: a vertical and horizontal drilling followed by high-pressure injection of water, sand and chemicals to fracture the rock and release sequestered oil and gas. Then, the fracturing liquid is drained back to the well, and the recovered products are processed to extract the natural gas or oil (15, 55). The Peace River Valley, located on the Montney Plateau, is one of the province's major unconventional oil and gas (UOG) development areas (20). Air and water quality can be affected in areas close to UOG activity, namely through the release of contaminants from operations and production. Studies have shown an increase in the concentration of different contaminants near UOG activities, including selenium, arsenic, strontium in private water wells (2), as well as benzene, formaldehyde and hydrogen sulfide in the air (4). In the Exposures in the Peace River Valley (EXPERIVA) study, Caron-Beaudoin et al. (2022) found a positive association between wells density/proximity and indoor air levels of chloroform, acetone, benzene, toluene, ethylbenzene and xylenes. A similar association was found with tap water levels of total trihalomethanes (49).

Preceding EXPERIVA, a pilot study carried out in the Peace River Valley in 2016 on 29 pregnant women found that concentrations of barium, aluminum and strontium in the hair and urine of pregnant women were higher than those measured by the Canadian Health Measures Survey (CHMS), a nationally-representative survey which collects and consolidates data on the health of Canadians (6, 50). Also, a higher concentration of urinary trans, trans-muconic acid, a non-specific metabolite of benzene, was found compared to the reference population of the CHMS (5). However, the spectrum of contaminants and magnitude of contamination related to UOG activities remains largely undocumented.

Radon is a colorless, odorless and invisible gas (12, 13). Naturally present and produced by the decay of uranium, its own decay leads to the emission of alpha rays, known for their serious health consequences, carcinogenicity and teratogenicity in particular (12, 13, 35-37). Few studies aimed to evaluate the association between radon concentration and UOG activity. Two studies measured outdoor radon concentrations close to hydraulic fracturing wells (9, 10). Burkhart et al. (2013) measured radon concentration in outdoor air close to an UOG site. They took four outdoor radon measurements of one hour or more, during four different processes at the same UOG site: before fracturing, during fracturing, after fracturing and while cracks are held in place, and during aspiration. The concentration before fracturing was 55.5 Bq/m³, increasing to 111 Bq/m³ during fracturing and maintained at this concentration during subsequent processes (10). Tait et al. (2013) placed three sensors inside the gas development area (with a distance from the nearest well of 60 m, 250 m and 500 m), and two sensors were placed outside the area (with distances from the nearest well of 1500 m and 4400 m). The results showed an overall increase in radon concentration during the night (probably driven by thermal inversion), as well as a significant positive association between radon concentration and the number of wells within a 3-km radius (9). The other data collected (including the average radon concentration) did not show differences of radon concentrations between the different locations and the control point (the control was 4400 m from the nearest well) (9).

Using more than 800,000 indoor air radon measurements from 1989 to 2013 in the state of Pennsylvania, Casey et al. (2015) found a stagnation in radon concentration between 1987 and 2003, followed by a notable increase from 2004 to 2012, particularly in townships with more than 100 hydraulic fracturing wells (8). This increase was associated with a significant development of hydraulic fracturing on the Marcellus Formation during this second period (more than 7000 wells drilled between 2005 and 2013 (8)). In addition, they found a positive association between the number of wells within a 1-km radius and indoor air radon concentrations in the summer, with the

concentration increasing by 1% in basements and by 2.8% on first floors for each additional well (8). Nevertheless, there was little information on the types of building construction, type of heating and energy supply for cooking. Sealing and insulation work in a building can influence indoor air radon concentrations (8). Black et al. (2019) used a similar database, removing the data related to vertical wells and developing four different calculation models (47). They observed no significant relationship between distance from a hydraulic fracturing well and indoor air radon concentrations. Xu et al. (2019) focused on the portion of the Marcellus formation present in Ohio State (11). Using 118,421 radon tests conducted between 2007 and 2014 and multilevel modeling, they found a significant negative correlation between distance from a well and indoor air radon concentrations (11). In this study, the average radon concentration (5.4 pCi/l or about 199 Bq/m³) was higher than the limit concentration at which the EPA recommends exposure mitigation (4 pCi/l or about 150 Bq/m³), and also higher than the WHO reference concentration for minimizing health risks (2.7 pCi/l or about 100 Bq/m³) (11). Using a different approach, one study measured radon concentrations inside natural gas pipelines. They found concentrations that exceeded 1000 Bq/m³ (48). Their objective was to analyze whether the use of natural gas containing radon for heating and cooking led to an increased risk of developing lung cancer. From their analysis, they did not find an increase in risk, but they did point to a pathway for radon to enter homes through gas consumption (48).

Those studies explored the relationship between UOG and indoor radon levels, but results are inconsistent. Furthermore, none of those studies were conducted in Canada. The present study aimed to analyze the association between the density and proximity of oil and gas wells and indoor air radon concentrations in Northeastern British Columbia (BC).

3.3 Materials and methods

3.3.1 Radon databases

We used the 44 measurements from the EXPERIVA study (2019-2020), and a database created by the British Columbia Centre for Disease Control (BCCDC), the British Columbia Radon Data Repository (BCRDR), gathering several radon measurement campaigns between 1992 and 2014. The BCRDR database was derived from three main initial studies, the first corresponding to a measurement period between 2014 and 2017, the second in 1992 and the third between 2009 and 2013.

For the majority of our database, including in EXPERIVA, radon measurements were performed using an AccuStarCanada Alpha Track detector. We have no information on the detector used for 213 measurements. In the EXPERIVA study, radon detectors were placed for 3 to 12 months in the residence of 85 study participants (in the period 2019-2020). To best reflect the radon exposure of the participants, it was requested that the radon detector be installed in the most used room in the unit and located on the lowest floor of the house. The detector was then no longer moved for the duration of the measurement. At the end of the measurement, the detectors were sent in a pre-paid envelope to AccuStar Labs by the participants. 41 measurements were impossible to analyze (e.g., broken detector, moving), leaving only 44 results. The BCRDR database included 497 indoor radon measures from Northeastern British Columbia. Radon measurements were performed over a period of 1 day to 21 months (mean, 119 days). For 213 measurements, we did not have the exact duration of the measurement. To respect the confidentiality of the participants, BCCDC includes a random error in residences GPS coordinates from 0 to 500 meters. For 44 participants in the BCCDC database, the random error was not sufficient to ensure confidentiality. Therefore, the GPS coordinates for these participants were removed from the databases, and we excluded these measurements from our final database.

When combining the remaining 453 radon measurements from the BCRDR with 44 from EXPERIVA, our final database contained 497 measurements.

Our database included indoor radon concentration, GPS coordinates of the dwelling where the radon measurement was done, the start and end dates of measure and floor of measure. With regards to the floor where the measurement was done, 59 data were missing, including 44 data from studies where participants were instructed to put the measurement sensor in the lowest room in the dwelling. We therefore performed imputation by replacing the 59 missing floor data as basement. For the 1992 study, only the start year (1992) without specific start and end dates was available. We therefore also proceeded to an imputation and used a start date of 01/01/1992 and an end date of 12/31/1992 to fully cover the year 1992. The year of construction of the dwelling was known for 192 measurements.

3.3.2 Oil and gas wells exposure metric: Inverse Distance Weighting

Using QGIS (Desktop 3.26.1), we first geocoded 1) all oil and gas wells drilled in British Columbia (n= 29588 as of 2019) using publicly available data from the *British Columbia Oil and Gas Commission*; 2) all dwellings included in our radon database. Then, for each dwelling, distances to all wells in the province were calculated.

Using R (4.2.1), we calculated the density of wells and IDW metrics using three buffer zones around the dwelling (2.5, 5 and 10 km). IDW exposure metrics were calculated based on the following equation used in other studies from our research group (49, 51) : $IDW_x = \sum_{i=1}^n (\frac{1}{d_i})$ where x was the buffer zone (2.5, 5 or 10 km), i was the well, d_i was the distance between the well and dwelling, and n was the number of wells. The wells included in the IDW metrics had to have a spud date before the last day of radon measurement.

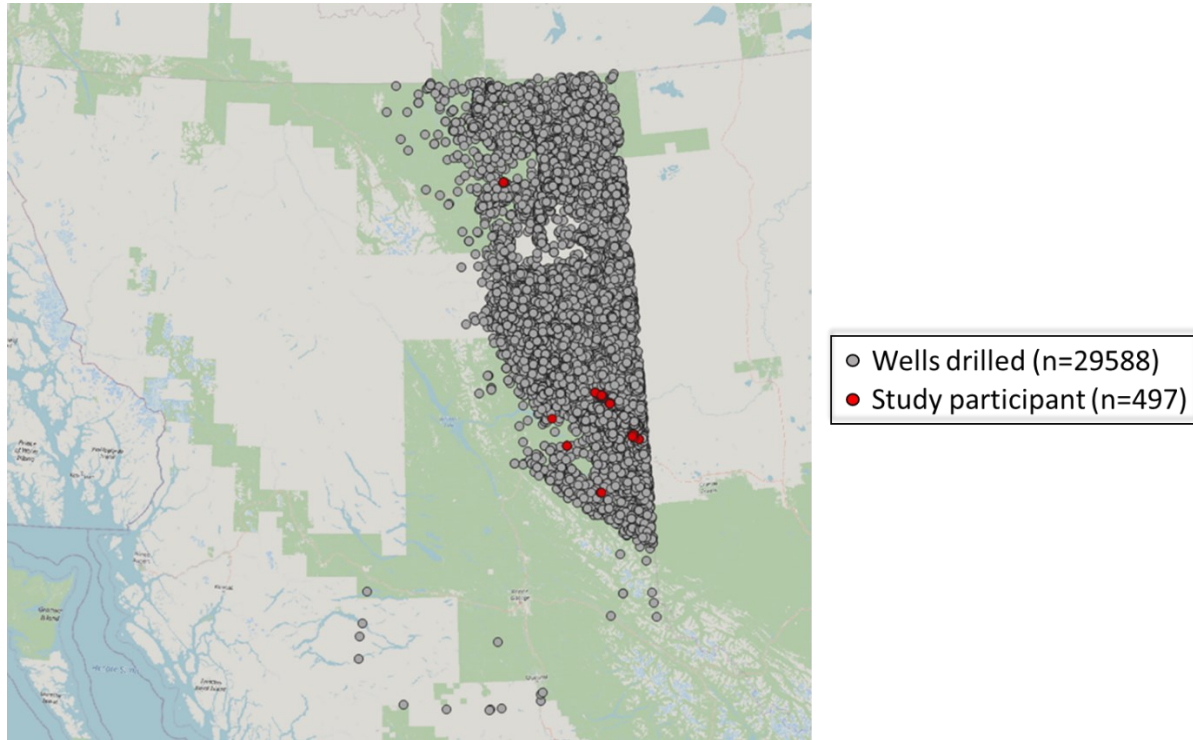


Figure 12: Representation of wells drilled in Northeastern British Columbia (grey) and study participants (red) (QGIS Desktop 3.26.1)

As a marker of exposure, several studies used the nearest neighbor approach, using the distance between the dwelling and the nearest well (11). With the random error of our database for the radon measurements coming from the BCCDC (0 to 500 meters), this approach seemed too approximate, and was only used for exploratory purposes.

3.3.3 Statistical analyses

In our database, some radon measurements were below the limit of detection (LOD) (n=24). Therefore, we performed imputations below the LOD (15 Bq/m³) using the LOD/ $\sqrt{2}$ (11 Bq/m³).

We first characterized the distribution of radon concentrations in the sample (median, mean, standard deviation). Second, the proportion of dwellings in the sample with a concentration above the current Canadian radon guideline (>200 Bq/m³) was calculated. With this information, we were able to estimate the proportion of dwellings in our sample for which an intervention would be recommended by Health Canada to reduce the radon concentration (29). We compared our radon concentrations and proportions of dwellings with radon concentration above 200 Bq/m³ with the Cross-Canada Survey of Radon Concentrations in Homes (56), which analyzed 13 807 radon measurements in Canada. In this database, we used data from British Columbia and Canada to compare with our results. In view of the diffusion characteristics of radon, a comparison was made between the measurements taken in the basement and the measurements taken on others floors with a student T-test (36).

We used multiple linear regression models to analyze the association between the density and proximity of oil and gas wells and indoor air radon concentration. The regression models were adjusted for the floor on which the radon measurement was carried out (basement or other floor). We ran the multiple regression models using the whole sample, as well as separately for each subgroup corresponding to an initial study (prior to database consolidation). The first subgroup corresponded to the EXPERIVA study (2019-2020). The second (2014-2017), third (1992) and last (2009-2013) subgroups were part of the BCRDR database.

To offer a more intuitive interpretation of the results of the regressions carried out, we converted the estimates into a percentage using the following equation: $100 \times (e^{\beta_1} - 1)$, where β_1 corresponds to the estimate obtained by regression analysis (54).

Exploratory analyses

We performed two exploratory analyses. Unconventional oil and gas methods replaced conventional (or vertical) drilling in British Columbia, with a tipping point in 2007 (20). We compared radon concentrations before and after 2007 with a student T-test, and we evaluated whether the association between the density/proximity of oil and gas wells and indoor radon concentrations differed before and after 2007 by performing analyses restricted to measurements taken before and after. Given the unequal geographic distribution of our participants, we conducted this exploratory analysis using radon measurements data from Fort St-John and Fort Nelson, which were both represented in radon measurements conducted before and after 2007.

We only had access to information on the year of dwelling construction for 192 measurements. We identified the year of construction according to six periods: 1946 to 1960; 1961 to 1970; 1971 to 1980; 1981 to 1990; 1991 to 2000 and 2001 to 2010. To evaluate the impact of construction year on indoor air radon concentrations, we performed an ANOVA test. The purpose of this analysis was to determine whether this covariable should be considered in future studies.

All statistical analyses were performed using R (4.2.1).

3.4 Results

3.4.1 Indoor radon concentration

The average indoor air radon concentration in our whole dataset was 78.56 Bq/m³. There was no statistically significant difference between the two data sources (EXPERIVA average: 73.98 Bq/m³ and BCRDR average: 79.1 Bq/m³). Table 2 shows the mean and median radon concentrations, and the proportion of dwellings above 200 Bq/m³. In our study, 8.2% of dwellings had concentrations above 200 Bq/m³: this proportion is higher than that of the Cross-Canada Survey of Radon Concentrations in Homes (6.9%, weighted by Canadian population) (56). In the Cross-Canada Survey of Radon Concentrations in Homes data, this proportion is 7.9% in British Columbia, and 3.9% after weighting by the province population. The proportion of dwellings with a radon concentration >200 Bq/m³ in our study was particularly high in the data from the EXPERIVA study (11.4%), compared to the BCRDR data (7.9%). It should be noted that almost half of the data in the BCRDR database comes from Cross-Canada Survey of Radon Concentrations in Homes database.

Table 2: Indoor air radon concentrations in our sample and in the Cross-Canada Survey of Radon Concentrations in Homes (56)

	Mean (SD) (Bq/m³)	Median (min; max) (Bq/m³)	≥100 Bq/m³ n (%)	≥200 Bq/m³ n (%)
Our study (n=497)	79 (97)	48 (9 ; 1251)	113 (23)	41 (8.2)
Experiva (n=44)	74 (87)	43(11 ; 344)	8 (18)	5 (11)
BCRDR (n=453)	79 (98)	51 (9 ; 1251)	105 (23)	36 (7.9)
Cross-Canada Survey of Radon Concentrations in Homes (n=13814)				
Canada (population-weighted)				(6.9)
British Columbia (n=1817)	70 (141)	23 (11 ; 2941)	328 (18)	143 (7.9)
British Columbia (population-weighted)				(3.9)

In our study, 38% of the measurements came from the basement, 50% from the main floor and upper floor, and 12% were unknown. After imputation, 50% of measurements were assumed to be taken in the basement, and 50% in the other floors (Table 3).

The radon concentrations were statistically higher in the basements compared to the other floors ($p=0.00004$). The median basement radon concentration was 56 Bq/m³ compared to 44 Bq/m³ in the other floors.

Table 3: Distribution of indoor air radon concentrations, IDW and wells density in our study (n=497)

	Median (min ; max)
Radon concentration on floors (Bq/m³)	
Basement (n=188, 38% of measurements)	59 (9 ; 1251)
Main floor (n=232, 47% of measurements)	43 (11 ; 344)
Upper floor (n=18, 3% of measurements)	67 (11 ; 136)
Unknown (n=60, 12% of measurements)	48 (11 ; 348)
Radon concentration on floors after imputations (Bq/m³)	
Basement (n=247, 50% of measurements)	56 (9 ; 1251)
Other floors (n=250, 50% of measurements)	44 (11 ; 344)
Inverse Distance Weighting (in buffer zone)	
10 km	19.33 (0 ; 65.54)
5 km	5.46 (0 ; 30.76)
2.5 km	1.47 (0 ; 23.61)
Wells density (in buffer zone)	
10 km	129 (0 ; 352)
5 km	18 (0 ; 58)
2.5 km	2 (0 ; 15)

3.4.2 Associations between density and proximity of oil and gas wells and indoor radon concentrations

The results of the linear regression models between the density and proximity of oil and gas wells and indoor air radon concentrations are shown in Table 4. In the 5 and 10-km buffer zones, we measured statistically significant negative associations between IDW metrics and indoor air radon concentrations, the β result was -1.3% (CI 95%: -2; -0.3) for the 5-km buffer zone and -0.7% (CI 95%: -1; -0.3) for the 10-km buffer zone. For the 2.5-km buffer zone, the association was not statistically significant ($p=0.08$). Using oil and gas wells densities as the exposure metric, we found similar negative associations for each buffer zone (Table 4). The decrease in radon was however modest: for example, an increase of one well in the 10-km buffer was associated with a decrease of 0.1% (CI 95%: -0.2; -0.05) in terms of indoor radon concentration.

In the 1st, 2nd and 4th subgroups, we found no statistically significant association ($p>0.05$) between IDW metrics or density of wells and indoor radon concentrations. On the other hand, IDW metrics and oil and gas well densities were negatively associated with indoor radon concentrations in the 3rd group (Table 4).

Table 4: Associations between oil and gas wells density, IDW, and indoor radon concentrations

	All participants (n=497)			1st group (n=44), 2019-2020			2nd group (n=38), 2014-2017			3rd group (n=213), 1992			4th group (n=202), 2009-2013		
	Estimate (95% CI) adjusted floor	% on	p value	Estimate (95% CI) adjusted floor	% on	p value	Estimate (95% CI) adjusted floor	% on	p value	Estimate (95% CI) adjusted floor	% on	p value	Estimate (95% CI) adjusted floor	% on	p value
IDW (within buffer zone)															
10 km	-0.7 (-1 ; -0.3)		0.001**	-1 (-4 ; 2)		0.54	-1 (-4 ; 1)		0.36	-1 (-2 ; -0.5)		0.0001***	-0.5 (-1 ; 0.2)		0.17
5 km	-1.3 (-2 ; -0.3)		0.02*	-0.3 (-8 ; 8)		0.94	-2 (-8 ; 3)		0.37	-3 (-4 ; -1)		0.0005***	-0.5 (-2 ; 1)		0.57
2.5 km	-2 (-4 ; 0.2)		0.08	-0.6 (-17 ; 16)		0.95	-4 (-14 ; 5)		0.36	-4 (-6 ; -1)		0.003**	0.1 (-3 ; 3)		0.93
Wells density (within buffer zone)															
10 km	-0.1 (-0.2 ; -0.05)		0.0007***	-0.2 (-0.7 ; 0.4)		0.5	-0.2 (-0.7 ; 0.3)		0.41	-0.2 (-0.3 ; -0.1)		0.0002***	-0.1 (-0.2 ; 0.02)		0.1
5 km	-0.6 (-1 ; -0.2)		0.004**	-0.07 (-3 ; 3)		0.95	-0.7 (-3 ; 1)		0.51	-1 (-2 ; -0.5)		0.0002***	-0.4 (-1 ; 0.2)		0.24
2.5 km	-2 (-4 ; -0.4)		0.02*	3 (-7 ; 12)		0.59	-3 (-10 ; 5)		0.46	-5 (-7 ; -2)		0.0002***	-1 (-4 ; 2)		0.6

IDW: Inverse Distance Weighting; * p ≤ 0.05; ** p ≤ 0.01; *** p ≤ 0.001

3.4.3 Exploratory analyses: closest well

In our model, the median of the distance to the nearest well was 1.77 km. The minimum distance was 0.11 km and the maximum distance was 9.03 km. Nevertheless, our GPS data had a random error of 500 meters, thus not allowing to have the exact distances to the wells. No statistically significant association was observed between the distance to the nearest well and indoor air radon concentrations ($p=0.46$).

3.4.4 Exploratory analyses: before and after 2007, and year of construction

Fort St John and Fort Nelson were the only locations for which measurements were available before and after 2007. We compared the evolution of radon concentrations and well metrics in these two cities before and after 2007. The median radon concentration before 2007 was 44 Bq/m³ (min: 11; max: 1251; IQR: 37), the median seemed to increase after 2007 to 52 Bq/m³ (min: 9; max: 259, IQR: 75.5) but the difference was not statistically significant for this subgroup. Similarly, we observed an increase in the median IDW and well density after 2007. For example, the median IDW for the 10-km buffer zone increases from 34.45 (min: 1.98; max: 50.27; IQR: 35.32) before 2007 to 45.84 (min: 3.2; max: 65.54; IQR: 45.26) after 2007. Also, in the 10-km buffer, the median well density increased from 199 before 2007 (min: 12; max: 281; IQR: 216.5) to 270 after 2007 (min: 21; max: 352; IQR: 268.75). However, the differences between the distributions of IDW or well density before and after 2007 were not statistically significant.

With regards to the years of construction, for the 201 data of which this information was available, the Anova test analyzing radon concentrations in the different groups of construction years was not statistically significant ($p=0.47$).

3.5. Discussion

The objective of this study was to analyze the association between the proximity and density of oil and gas wells and indoor air radon concentrations in homes in Northeastern British Columbia. We found small negative associations, largely influenced by measurements from 1992, when the majority of oil and gas development were conventional (20), or a lack of association. We found higher radon concentrations in the basement compared to other floors. Our sample had a proportion of 8.2% of dwellings with radon concentrations higher than 200 Bq/m³, which is higher compared to this proportion in Canada and in British Columbia. We did not find significant differences in the distribution of radon concentrations before and after 2007.

3.5.1 Comparison with other studies

A limited number of studies investigated the potential impact of UOG on indoor air radon concentrations. Casey et al. (2015) found that UOG was one of the factors associated with indoor radon concentrations in Pennsylvania between 1989 and 2013 (8). They also observed an increasing trend in basement radon concentrations after 2004, with indoor radon concentrations higher in counties with more than 100 UOG wells (8). With a large radon database (over 118,000 measurements between 2007 and 2014), Xu et al. (2019) found an association between shorter distance from the nearest well and higher radon concentration (11). One study found no association between proximity to oil and gas exploration areas and radon concentrations (47). In our study, we found small negative associations between density/proximity of oil and gas wells and indoor radon concentrations, and we did not find any statistically significant differences in radon concentrations before and after 2007. It is difficult to interpret negative associations in our results, in particular because these results are largely influenced by the 1992 subgroup, when the majority of wells were conventional, and therefore did not use hydraulic fracturing, studies that have shown associations have been conducted from unconventional wells (8, 11, 19). Studies

finding positive associations had greater statistical power than ours, with samples comprising hundreds of thousands of radon measurements (8, 11). As expected, we found a higher radon concentration in the basements of the dwellings, in line with the results of the study by Casey et al. (2015) (8). Overall, our radon concentrations were lower (median and mean) than in other studies that found significant associations with oil and gas operations (8, 11). Multiple factors may explain these lower concentrations, such as the geological formation, type of dwellings, or prevention actions to decrease radon exposure. Black et al. (2019) emphasized that it is important to include the radon concentration before oil and gas development in the analyses, as some rock formations naturally have significant radon concentrations (47). The best approach could be to carry out measurement campaigns before oil and gas development. Unfortunately, this data is unavailable for British Columbia. We did not find a significant increase in concentrations after 2007, in contrast to Casey et al. (2015) who found stable concentrations in basement from 1987 to 2003, followed by an increase between 2004 and 2012 (8).

3.5.2 Strengths and limitations

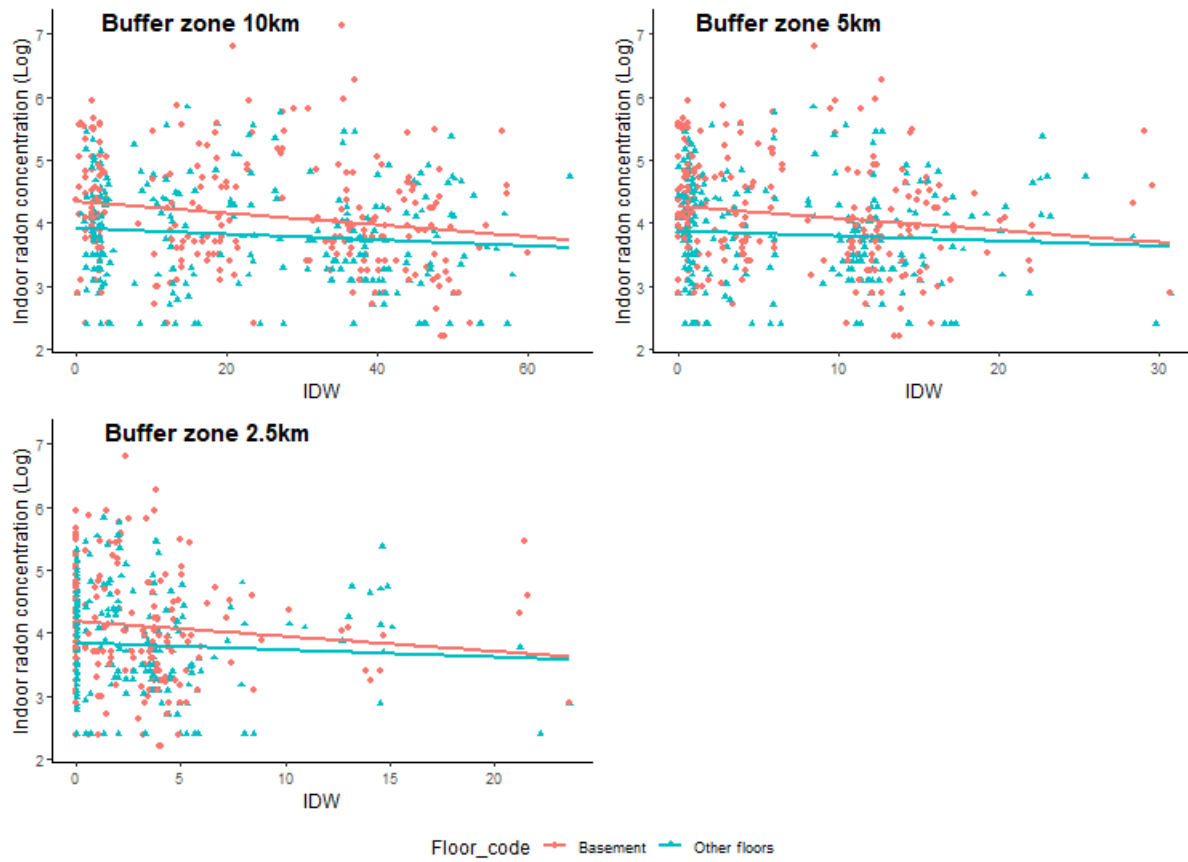
To the best of our knowledge, this is the first study reporting residential concentrations of radon in Northeastern British Columbia and investigating the potential impacts of oil and gas operations on residential radon. In an effort to explore this question, we have chosen to include numerous exposure estimation markers (IDW, wells density, nearest well) as well as three different buffer zones. The relatively small number of data in our study limits its statistical power and does not allow us to conclude whether the lack of positive associations indicates that oil and gas exploitation does not increase indoor air radon concentrations. In our study, the different databases used were not geographically distributed in the same way and corresponded to different measurement periods, making it difficult to compare the radon concentrations in the groups before and after 2007. In addition, we were unable to precisely estimate the distance between residences and wells given the random error added to GPS coordinates for most of the data. Furthermore, the

inclusion of other radon determinants in our models, such as the year of construction of the dwelling and if radon reduction systems have been put in place in the dwelling could help interpret our results. The type of oil and gas well (conventional or not) should be included in the regression to compare their potential contributions to radon concentration. Also, the different phases of unconventional gas development may have different impacts on the emission of contaminants including radon. The lack of information in the literature on this specific area makes this analysis difficult, and not all researchers have found a correlation between oil and gas development and radon concentrations (47). It may be important to consider whether the hypothetical increase in radon could come from the soil naturally from cracks in the cervix and deep rocks, or whether the transmission and distribution of natural gas in homes could get radon inside, like in Mitchell et al. (2016) study (48). Also, indoor air radon resulting from the off-gassing of tap water were not addressed in this work, but could have an influence on the concentration in the home (52, 53). Two other elements may have caused bias in our analyses. First, a detection bias is possible in this context, and in radon measurements in general. Indeed, it would be interesting to ask whether the people of territories assimilated to high radon concentrations carry out more preventive actions about radon. Also, awareness and health education actions between different territories could have an impact on radon prevention, and therefore bring lower radon concentrations through prevention and not through external action (e.g. oil and gas exploitation). The second bias concerns the imputations made, in particular concerning the measurement floor. Assuming that measurements with no information on floor were conducted in the basement might not represent the reality, and therefore alter the results.

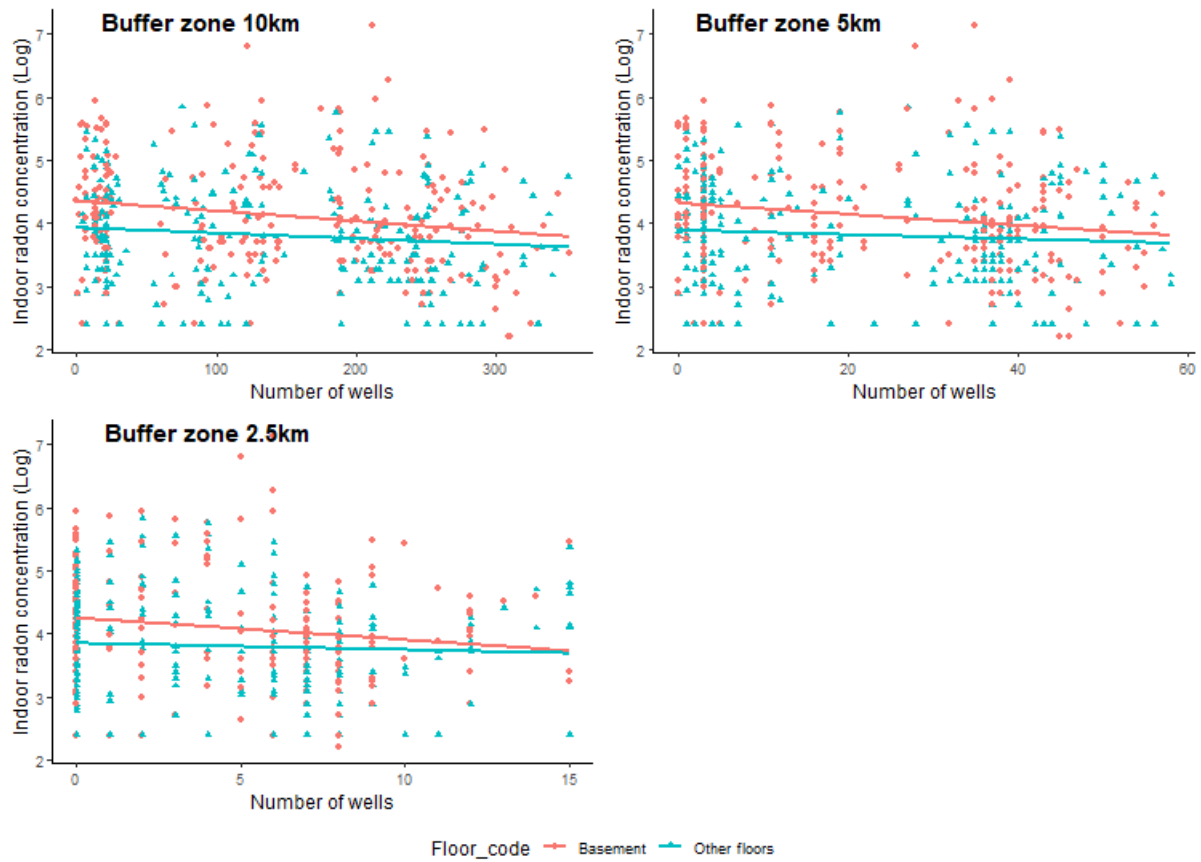
3.6 Conclusion

We found some small negative associations between metrics of proximity and density of oil and gas wells and indoor air radon concentration. The relatively small sample size and lack of covariates (e.g., age and condition of the dwelling, phase of exploitation, concentration of radon before exploitation) further limit our interpretation of the results. A study including the type of well (conventional or not), the operating phase during the measurement, the precise location of the dwelling, the year of construction of the house, the presence or not of specific insulation or ventilation elements as well as the use of natural gas in the dwelling (heating, cooking) could allow a deepening of these assessments. As the proportion of dwellings with radon concentrations above 200 Bq/m³ remains significant, it seems necessary to continue investigating radon exposure in this region.

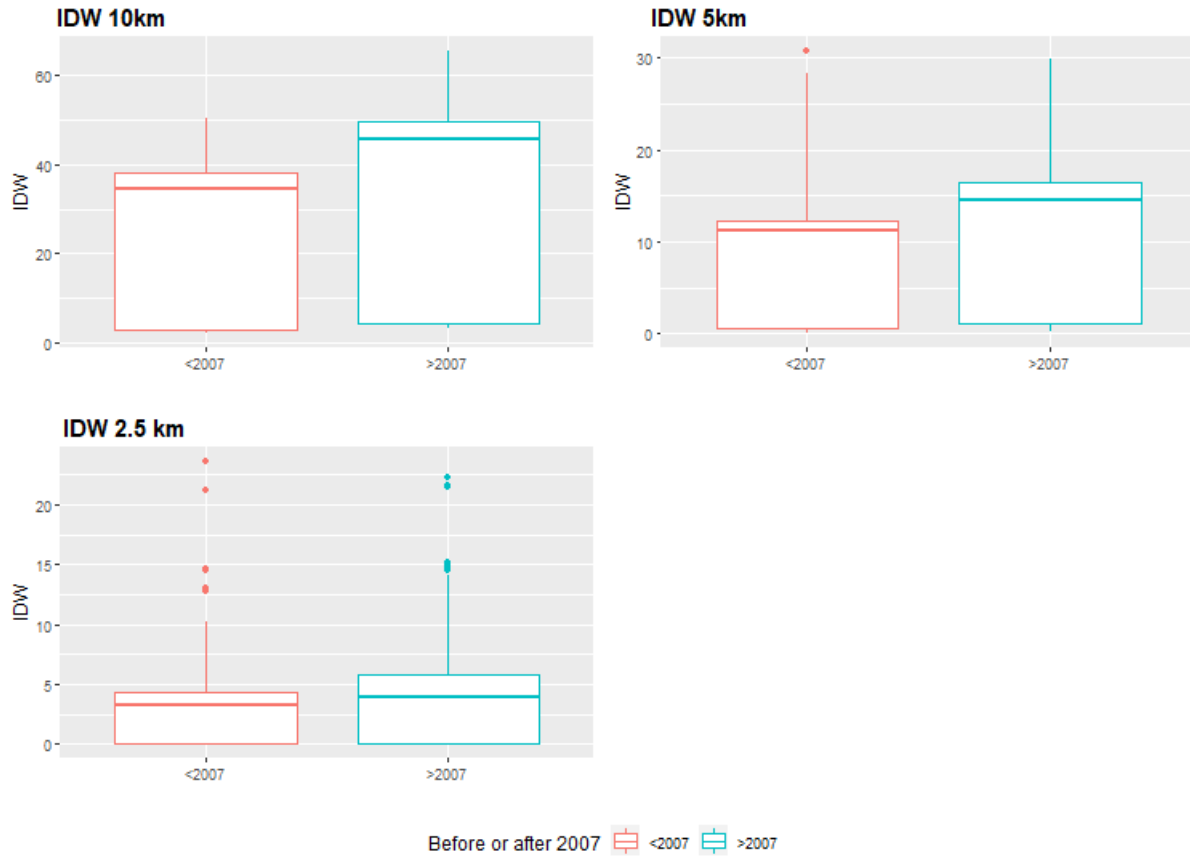
Supplementary materials



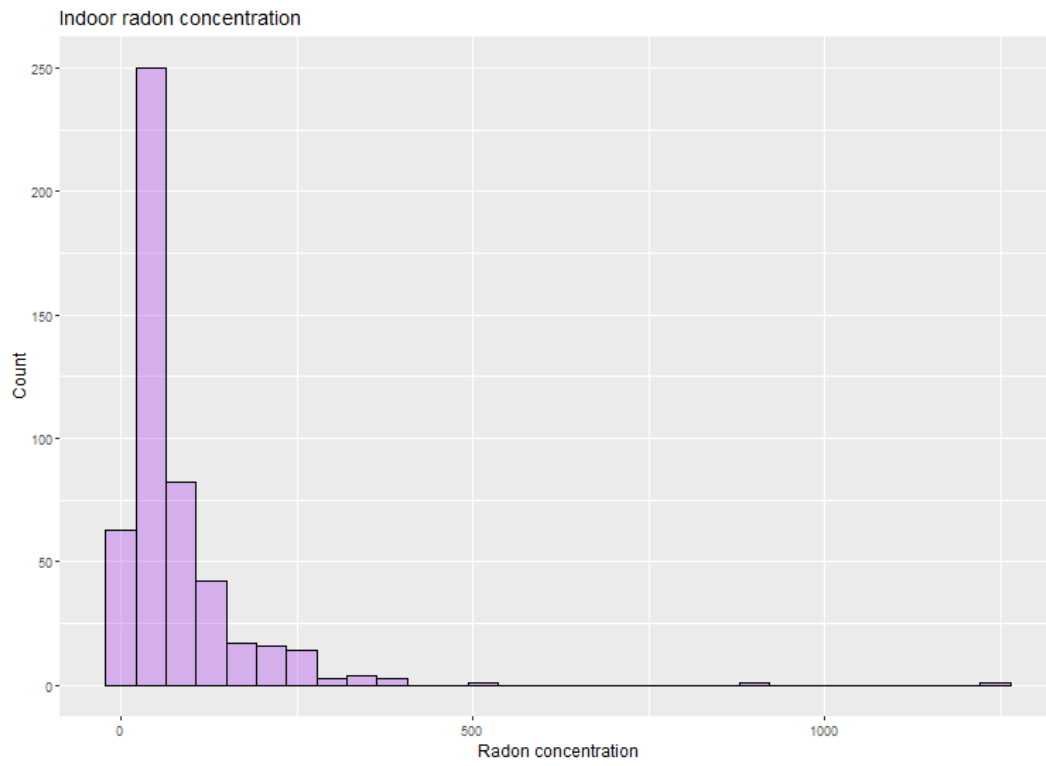
Supp 1 (Figure): Linear regression between IDW and indoor radon concentration, separated on floor



Supp 2 (Figure): Linear regression between wells density (number of wells) and indoor radon concentration, separated on floor



Supp 3 (Figure): IDW distribution before and after 2007, in Fort St John and Fort Nelson group



Supp 4 (Figure): Distribution of indoor radon concentration (Bq/m³)

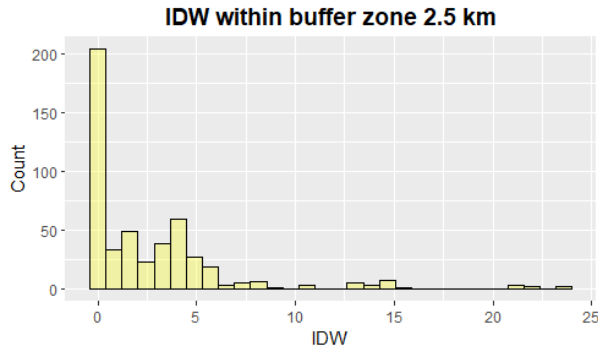
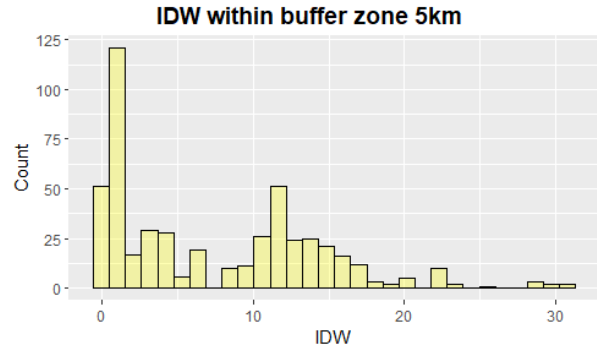
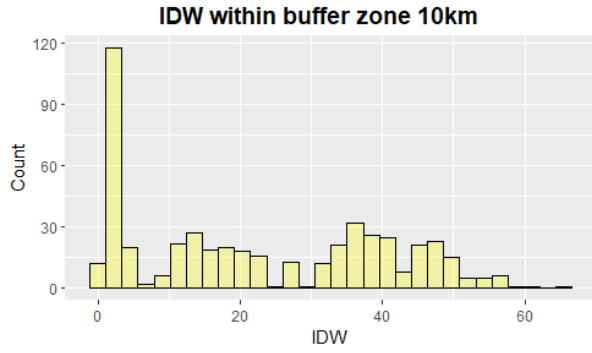
Supp 5 (Table): Radon concentration, IDW and wells density (number of wells) distributions in Fort St John and Fort Nelson subgroup

	Before 2007 (n= 207)		After 2007 (n= 102)	
	Median (min :max)	IQR	Median (min : max)	IQR
Indoor radon concentration	44 (11 ; 1251)	37	52 (9 ; 259)	75.5
IDW				
10 km	34.45 (1.98 ; 50.27)	35.32	45.84 (3.2 ; 65.54)	45.26
5 km	11.15 (0 ; 30.76)	11.62	14.48 (0.22 ; 29.85)	15.31
2.5 km	3.31 (0 ; 23.61)	4.32	3.93 (0 ; 22.21)	5.76
Wells density				
10 km	199 (12 ; 281)	216.5	270 (21 ; 352)	268.75
5 km	35 (0 ; 47)	35	44 (1 ; 58)	45
2.5 km	6 (0 ; 12)	7	7 (0 ; 15)	9

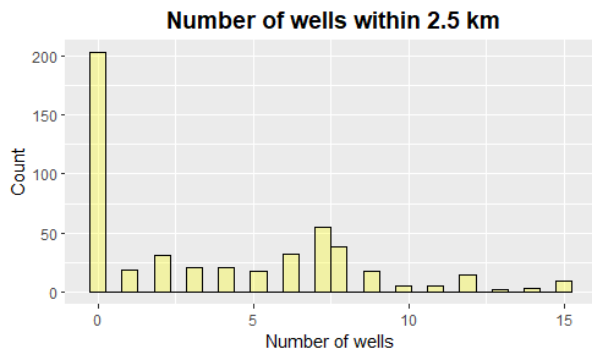
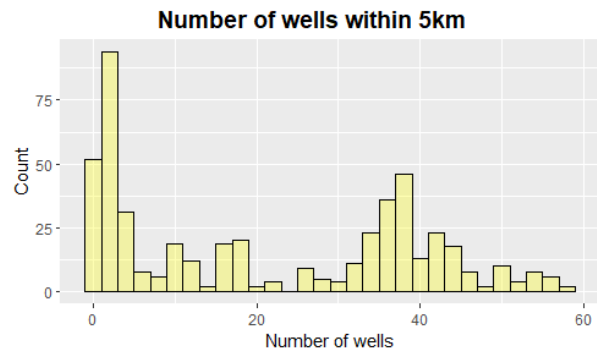
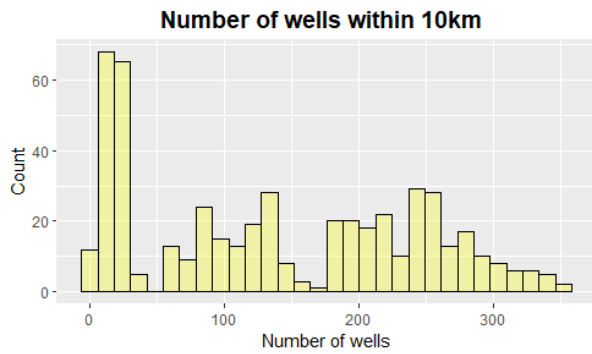
IQR: Interquartile range

Supp 6 (Table): Linear regression results before and after 2007, in Fort St John and Fort Nelson subgroup

	Before 2007 (n=207)		After 2007 (n=102)	
	Estimate % (95%CI)	p value	Estimate % (95% CI)	p value
IDW				
10 km	-1 (-2 ; -0.5)	0.0002***	0.02 (-0.8 ; 0.8)	0.97
5 km	-2 (-4 ; -1)	0.001**	1 (-1 ; 3)	0.36
2.5 km	-3 (-6 ; -1)	0.005**	3 (-0.7 ; 6.4)	0.12
Wells density				
10 km	-0.2 (-0.3 ; -0.1)	0.0002***	-0.03 (-0.2 ; 0.1)	0.7
5 km	-1 (-2 ; -0.4)	0.0005***	-0.03 (-1 ; 1)	0.94
2.5 km	-5 (-7 ; -2)	0.0002***	2 (-2 ; 5)	0.39



Supp 7 (Figure): Inverse Distance Weighting (IDW) distribution



Supp 8 (Figure): Well density (number of wells) distribution

4. Conclusion

4.1 Résultats

À partir des différentes analyses réalisées et des résultats obtenus, nous ne pouvons conclure à une association positive entre l'exploitation pétrolière et gazière et les concentrations intérieures de radon dans notre échantillon. Nos résultats mettent en avant, soit une absence d'association, pouvant être en lien avec le faible nombre de mesure dans l'échantillon, soit une association négative modeste. Ces associations négatives sont principalement attribuables aux données de l'étude de 1992, où la majorité de l'exploitation gazière et pétrolière était conventionnelle, et donc rarement associée à des activités de fracturation hydraulique (20). Casey et al. (2015) avaient mis en avant une association entre l'exploitation non-conventionnelle pétrolière et gazière et les concentrations intérieures de radon en Pennsylvanie entre 1989 et 2013, ainsi que des concentrations de radon plus élevées dans les comtés comptant plus de 100 puits (8). À partir de données similaires, Black et al. (2019) ne trouvaient pas d'association entre les concentrations de radon et les activités d'exploitation pétrolière et gazière (47). Xu et al. (2019) trouvaient une association entre la distance du puits le plus proche et la concentration de radon dans la résidence (11). Ces trois études bénéficiaient d'une base de données plus importante, comportant des centaines de milliers de mesures de radon, apportant une puissance statistique plus grande. Aussi, les concentrations de radon retrouvées dans les échantillons des études de Casey et al. (2015) et Xu et al. (2019) étaient supérieures aux nôtres (8, 11).

Les données en 1992 représentaient initialement un excellent témoin de l'évolution de l'exposition avant et après 2007. Néanmoins, une comparaison précise était difficile au vu des caractéristiques géographiques différentes avant et après 2007. C'est pourquoi la comparaison des deux périodes fut réalisée dans un sous-groupe comprenant des données obtenues à Fort Nelson et Fort St John avant et après 2007. L'augmentation de l'exploitation pétrolière et gazière dans la province

après 2007 est décrite par le ministère de l'exploitation de gaz naturel de Colombie-Britannique, majoritairement à travers une exploitation non-conventionnelle (19, 21). Nous retrouvons dans notre sous-groupe une augmentation des médianes d'IDW et de nombre de puits après 2007, en particulier pour le périmètre 10 km. Néanmoins, aucune différence statistiquement significative n'a été mesurée entre distributions pour ces différentes variables (concentration de radon, IDW, densité des puits) avant et après 2007. Nous ne constatons donc pas, sur la base des données disponibles, une augmentation des concentrations de radon après 2007 au sein de l'échantillon, contrairement aux résultats de l'étude de Casey et al. (2015), où une augmentation des concentrations de radon a été observée entre 2004 et 2012 (8). Enfin, nous n'avons pas observé de différence dans les concentrations de radon selon les années de construction des bâtiments dans le sous-groupe pour lequel cette donnée était disponible.

4.2 Retombées

Ce travail a mis en avant des résultats non significatifs, ou des associations significatives et négatives, entre la proximité et densité de zones d'exploitations pétrolières et gazières et la concentration de radon dans les résidences du Nord-Est de la Colombie-Britannique. Au vu de plusieurs limites, il est difficile d'établir une conclusion forte sur ces associations. Néanmoins, ce travail a permis la mobilisation et la mise en commun de différentes mesures de concentration de radon (provenant du BCRDR et de EXPERIVA). De nombreuses résidences présentaient des concentrations supérieures à la ligne directrice établie par Santé Canada, de 200 Bq/m³ (8.2% dans notre échantillon), indiquant un risque potentiel pour ces populations. Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une étude (EXPERIVA) traitant des contaminants associés à l'exploitation pétrolière et gazière, et bien qu'une association positive avec le radon ne soit pas retrouvée à ce jour, plusieurs associations avec des contaminants ont pu être mises en avant dans d'autres travaux d'EXPERIVA, dont certains composés organiques volatils dans l'air et l'eau des résidences (49).

4.3 Perspectives

Une étude présentant plus de variables sur l'exploitation pétrolière et gazière et sur les logements permettrait d'affiner les analyses et conclusions sur cette thématique. Tout d'abord, il serait intéressant d'inclure le stade d'exploitation durant la mesure, afin d'estimer si une période de l'exploitation est plus à risque pour les concentrations intérieures de radon. Néanmoins, l'utilisation de cette variable portant sur la phase de l'exploitation, demande un vaste travail de regroupement, analyse, et tri à partir de multiples bases de données existantes. En effet, il n'existe pas à ce jour de base de données regroupant précisément ces informations, il est donc nécessaire de croiser différentes données/informations sur les actes réalisés dans les zones d'exploitations afin d'en déduire le stade. Les informations sur le stade d'exploitation peuvent être couplés, ou permettre de définir le type d'exploitation (conventionnel ou non-conventionnel), les stades, ou phases, d'exploitation variant en fonction du type d'exploitation. Ce travail est en cours dans le laboratoire du Professeur Caron-Beaudoin à l'Université de Toronto-Scarborough, et pourrait permettre l'inclusion de variables précisant le type d'exploitation et le stade d'exploitation dans le futur. Aussi, la concentration de radon dans un logement dépend nécessairement de l'état du logement, notamment en ce qui concerne les matériaux de construction, l'entretien, l'isolation et la ventilation des pièces (notamment des pièces les plus basses). Il serait donc intéressant de travailler avec des spécialistes du génie civil, de la sûreté nucléaire ou bien de la géologie afin de mettre en commun et développer les connaissances communes sur les déterminants du radon. Ceci pourrait permettre d'inclure des variables de précision en ce qui concerne la prédisposition d'un logement à concentrer le radon. Même si nous disposions de la période de construction du logement pour certaines de nos mesures, cette information n'est pas suffisante pour explorer l'état des bâtiments, elle pourrait même porter à confusion. En effet, seules des précisions sur l'état des logements, les pratiques de constructions, les éventuelles rénovations, la composition de l'isolation, la ventilation et le type de fondation permettraient d'évaluer en profondeur le profil

de l'habitat. Aussi, afin de caractériser globalement l'exposition au radon, et d'aborder différents points d'entrées, il serait intéressant de poursuivre la réflexion sur l'exposition au radon par l'eau potable (52, 53). De façon générale, il est préférable de tendre vers une exhaustivité des données afin d'éviter de devoir réaliser des imputations limitant la généralisation des résultats (par exemple l'étage de mesure du radon).

Il serait aussi intéressant de poursuivre les études de mesures extérieures de radon, de mettre en avant les concentrations de radon à la base du puits, ainsi que dans différents périmètres autour du puits. Ce travail, déjà abordé par des chercheurs (10, 48), mettait en avant de grandes concentrations de radon autour des puits et dans les pipelines (régulièrement >1000 Bq/m³ (10, 48)). Une réflexion sur ce sujet permettrait de concentrer les mesures sur les logements très proches des exploitations (par exemple à moins de 1 km), ainsi que de mesurer les risques d'exposition des travailleurs des sites d'exploitation pétrolière et gazière.

Enfin, il serait intéressant d'inclure à ce type d'études une réflexion sociologique sur l'impact des actes de sensibilisation et d'éducation sur le radon entre les différents territoires, afin d'encadrer les possibles variations de concentrations liées à des campagnes interventionnelles de santé publiques (par exemple une baisse des concentrations suite à une large campagne de sensibilisation et de conseil en prévention).

La proportion de logements dans notre échantillon comportant des concentrations de radon supérieures à 200 Bq/m³ (8.2%) met en avant l'importance de poursuivre l'étude du radon et de ses déterminants dans cette région.

Bibliographie

1. Government of Canada. Natural gas facts 2020 [Available from: <https://www.nrcan.gc.ca/science-data/data-analysis/energy-data-analysis/energy-facts/natural-gas-facts/20067>].
2. Fontenot BE, Hunt LR, Hildenbrand ZL, Carlton Jr DD, Oka H, Walton JL, et al. An Evaluation of Water Quality in Private Drinking Water Wells Near Natural Gas Extraction Sites in the Barnett Shale Formation. *Environmental Science & Technology*. 2013;47(17):10032-40.
3. United States Government. What environmental issues are associated with hydraulic fracturing? [Available from: https://www.usgs.gov/faqs/what-environmental-issues-are-associated-hydraulic-fracturing?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products].
4. Macey GP, Breech R, Chernaik M, Cox C, Larson D, Thomas D, et al. Air concentrations of volatile compounds near oil and gas production: a community-based exploratory study. *Environmental Health*. 2014;13(1):82.
5. Caron-Beaudoin É, Valter N, Chevrier J, Ayotte P, Frohlich K, Verner M-A. Gestational exposure to volatile organic compounds (VOCs) in Northeastern British Columbia, Canada: A pilot study. *Environment International*. 2018;110:131-8.
6. Caron-Beaudoin É, Bouchard M, Wendling G, Barroso A, Bouchard MF, Ayotte P, et al. Urinary and hair concentrations of trace metals in pregnant women from Northeastern British Columbia, Canada: a pilot study. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*. 2019;29(5):613-23.
7. Long CM, Briggs NL, Bamgbose IA. Synthesis and health-based evaluation of ambient air monitoring data for the Marcellus Shale region. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2019;69(5):527-47.
8. Casey JA, Ogburn EL, Rasmussen SG, Irving JK, Pollak J, Locke PA, et al. Predictors of Indoor Radon Concentrations in Pennsylvania, 1989–2013. *Environmental Health Perspectives*. 2015;123(11):1130-7.
9. Tait DR, Santos IR, Maher DT, Cyronak TJ, Davis RJ. Enrichment of Radon and Carbon Dioxide in the Open Atmosphere of an Australian Coal Seam Gas Field. *Environmental Science & Technology*. 2013;47(7):3099-104.
10. James Burkhart TH, George Bolling. POTENTIAL RADON RELEASE DURING FRACKING IN COLORADO 2013 [Available from: https://aarst.org/proceedings/2013/03_POTENTIAL_RADON_RELEASE_DURING_FRACKING_IN_COLORADO.pdf].
11. Xu Y, Sajja M, Kumar A. Impact of the Hydraulic Fracturing on Indoor Radon Concentrations in Ohio: A Multilevel Modeling Approach. *Frontiers in Public Health*. 2019;7.
12. Santé Canada. Le radon : Effets sur la santé 2019 [Available from: <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/securete-et-risque-pour-sante/radiation/radon/effets-sante.html>].
13. Kang J-K, Seo S, Jin YW. Health Effects of Radon Exposure. *Yonsei Medical Journal*. 2019;60(7):597.
14. Centre de collaboration nationale en santé environnementale. Aperçu de l'exploitation du gaz de schiste et de la fracturation hydraulique au Canada 2014 [Available from: https://www.cnse.ca/sites/default/files/Apercu_gaz_schiste_fracturation_hydraulique_Canada_nov_2014_draft.pdf].
15. Gouvernement du Canada. Exploration et production des ressources de schiste et de réservoirs étanches. 2020.
16. Canadian Association of Petroleum Producers. L'histoire du gaz naturel au Canada [Available from: <https://www.capp.ca/fr/gaz-naturel/lhistoire-du-gaz-naturel-au-canada/>].

17. British Columbia ministry of natural gas development. Conventional versus Unconventional Oil and Gas [Available from: https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/farming-natural-resources-and-industry/natural-gas-oil/petroleum-geoscience/conventional_versus_unconventional_oil_and_gas.pdf.
18. Gouvernement du Canada. Réglementation des ressources de schiste et de réservoirs étanches. 2020.
19. British Columbia's Oil and Gas Commission. British Columbia's Oil and Gas Reserves and Production Report 2016 2016.
20. Adams C, Janicki, E., Balogun, A. . Summary of shale gas activity in Northeast British Columbia 2013; in Oil and Gas Reports 2016, *British Columbia Ministry of Natural Gas Development*. 2016. p. 1-39.
21. British Columbia Oil & Gas Commission. British Columbia's Oil and Gas Reserves and Production Report 2019. 2019.
22. Hobart M. King. Directional and Horizontal Drilling in Oil and Gas Wells [Available from: <https://geology.com/articles/horizontal-drilling/>.
23. Connaissances des énergies. Fracturation hydraulique 2017 [Available from: <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/fracturation-hydraulique>.
24. United States Geological Survey. What is hydraulic fracturing ? [Available from: https://www.usgs.gov/faqs/what-hydraulic-fracturing?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products.
25. Environmental Protection Agency. The Process of Unconventional Natural Gas Production [Available from: <https://www.epa.gov/uog/process-unconventional-natural-gas-production>.
26. Kahrilas GA, Blotevogel J, Stewart PS, Borch T. Biocides in Hydraulic Fracturing Fluids: A Critical Review of Their Usage, Mobility, Degradation, and Toxicity. *Environmental Science & Technology*. 2015;49(1):16-32.
27. Assemblée nationale française. Rapport d'information par la mission d'information sur les gaz et huile de schiste. 2011.
28. United States Geological Survey. Generalized image showing the key points in hydraulic fracturing [Available from: <https://www.usgs.gov/media/images/generalized-image-showing-key-points-hydraulic-fracturing>.
29. Santé Canada. Guide sur les mesures du radon dans les maisons 2017 [Available from: <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/publications/securite-et-risque-pour-sante/guide-mesures-radon-maisons.html>.
30. Ministère des solidarités et de la santé. Radon [Available from: <https://solidarites-sante.gouv.fr/sante-et-environnement/batiments/article/radon>.
31. Santé Canada. Enquête pancanadienne sur les concentrations de radon dans les habitations. 2012.
32. Jean-Claude Dessau FG, Benoît Lévesque, Claude Prévost, Jean-Marc Leclerc, Jean-Claude Belles-Isles. Le radon dans l'environnement intérieur - Etat de la situation au Québec 2006 [Available from: <https://www.inspq.qc.ca/bise/le-radon-dans-l-environnement-interieur-etat-de-la-situation-au-quebec>.
33. Gagnon F, Poulin P, Leclerc JM, Dessau JC, Abab A, Arsenault P, et al. Implementation of a radon measurement protocol and its communication plan by child care centre managers in Québec. *Can J Public Health*. 2016;107(3):e319-e25.
34. Santé Canada. Concentration de radon au Canada. 2019.
35. World Health Organization. WHO Handbook on indoor radon a public health perspective. 2009.
36. Santé Canada. Le radon : Il y en a dans votre maison 2016 [Available from: <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/sante-environnement-milieu-travail/rapports-publications/radiation/radon-votre-maison-sante-canada-2009.html>.
37. TYMEN GEORGES, editor Présentation du radon. Exposition au radon dans les habitations: évaluation et gestion du risque; 1998.

38. Lu Y, Liu L, Chen Q, Wei J, Cao G, Zhang J. Domestic radon exposure and risk of childhood leukemia: A meta-analysis. *J buon.* 2020;25(2):1035-41.
39. Papatheodorou S, Yao W, Vieira CLZ, Li L, Wylie BJ, Schwartz J, et al. Residential radon exposure and hypertensive disorders of pregnancy in Massachusetts, USA: A cohort study. *Environment International.* 2021;146:106285.
40. Riise HKR, Sulo G, Tell GS, Iglund J, Nygård O, Iversen AC, et al. Association Between Gestational Hypertension and Risk of Cardiovascular Disease Among 617 589 Norwegian Women. *Journal of the American Heart Association.* 2018;7(10):e008337.
41. Fauvel JP. [Hypertension during pregnancy: Epidemiology, definition]. *Presse Med.* 2016;45(7-8 Pt 1):618-21.
42. République Française. Radon S'informer pour mieux se protéger [Available from: <https://www.georisques.gouv.fr/risques/radon>].
43. Botha R, Lindsay R, Newman RT, Maleka PP, Chimba G. Radon in groundwater baseline study prior to unconventional shale gas development and hydraulic fracturing in the Karoo Basin (South Africa). *Applied Radiation and Isotopes.* 2019;147:7-13.
44. Atkins ML, Santos IR, Perkins A, Maher DT. Dissolved radon and uranium in groundwater in a potential coal seam gas development region (Richmond River Catchment, Australia). *J Environ Radioact.* 2016;154:83-92.
45. Daraktchieva Z, Wasikiewicz JM, Howarth CB, Miller CA. Study of baseline radon levels in the context of a shale gas development. *Sci Total Environ.* 2021;753:141952.
46. Li L, Blomberg AJ, Spengler JD, Coull BA, Schwartz JD, Koutrakis P. Unconventional oil and gas development and ambient particle radioactivity. *Nature Communications.* 2020;11(1).
47. Black KJ, McCoy SJ, Weber JG. Fracking and indoor radon: Spurious correlation or cause for concern? *Journal of Environmental Economics and Management.* 2019;96:255-73.
48. Mitchell AL, Griffin WM, Casman EA. Lung Cancer Risk from Radon in Marcellus Shale Gas in Northeast U.S. Homes. *Risk Analysis.* 2016;36(11):2105-19.
49. Caron-Beaudoin É, Whyte KP, Bouchard MF, Chevrier J, Haddad S, Copes R, et al. Volatile organic compounds (VOCs) in indoor air and tap water samples in residences of pregnant women living in an area of unconventional natural gas operations: Findings from the EXPERIVA study. *Science of The Total Environment.* 2022;805:150242.
50. Santé Canada. The Canadian Health Measures Survey 2020 [Available from: <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/environmental-workplace-health/environmental-contaminants/human-biomonitoring-environmental-chemicals/canadian-health-measures-survey.html>].
51. Caron-Beaudoin É, Whitworth KW, Bosson-Rieutort D, Wendling G, Liu S, Verner M-A. Density and proximity to hydraulic fracturing wells and birth outcomes in Northeastern British Columbia, Canada. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology.* 2021;31(1):53-61.
52. Institut de Radioprotection et de Surêté Nucléaire. D'où vient le radon ? [Available from: <https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Environnement/expertises-radioactivite-naturelle/radon/Pages/2-D-ou-vient-le-radon.aspx>].
53. Patrick Poulin M-HB. Le radon dans l'eau souterraine de la région des basses-terres du Saint-Laurent; influence de la géologie locale et risque à la santé 2014 [Available from: <https://www.inspq.qc.ca/bise/le-radon-dans-l-eau-souterraine-de-la-region-des-basses-terres-du-saint-laurent-influence-de-la-geologie-locale-et-risque-la-sante>].
54. Cornell Statistical Consulting Unit. Interpreting Regression Coefficients for Log-Transformed Variables 2020 [Available from: https://cscu.cornell.edu/wp-content/uploads/83_logv.pdf].

55. Wollin K-M, Damm G, Foth H, Freyberger A, Gebel T, Mangerich A, et al. Critical evaluation of human health risks due to hydraulic fracturing in natural gas and petroleum production. *Archives of Toxicology*. 2020;94(4):967-1016.
56. Health Canada. Cross-Canada Survey of Radon Concentrations in Homes. 2012.