

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX ET SANITAIRES RELATIFS AUX PUITTS DE
PÉTROLE ET DE GAZ INACTIFS : ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ
DES MILIEUX NATURELS, BÂTIS ET HUMAINS DE LA RÉGION DE LA
MONTÉRÉGIE AU QUÉBEC

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN SCIENCE DE L'ENVIRONNEMENT

SOFIANE SAHNINE

DÉCEMBRE 2020

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.07-2011). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Après avoir rendu grâce à Dieu le Tout-Puissant et le Miséricordieux, je tiens à remercier ma directrice de maîtrise, Myriam Fillion, professeure à l'Université TÉLUQ, professeure associée à l'UQAM, pour plusieurs raisons. Tout d'abord, merci Myriam d'avoir fait confiance à mon idée pour ce projet. Merci pour ton soutien moral et académique, ta patience, ta disponibilité et surtout pour l'immense générosité de tes connaissances scientifiques. Finalement, merci pour tes suggestions, qui ont toujours été utiles et qui ont contribué au développement du projet.

Je tiens également à remercier mon co-directeur, Yves Baudouin, d'avoir cru en mon projet, et qui a accepté de nous joindre aussi tard malgré ses occupations externes. Merci, Yves, pour tes conseils, notamment en ce qui concerne la cartographie. Enfin, je te remercie de m'avoir soutenu dans ma demande de bourse. Je te souhaite plein de succès dans ton nouveau projet.

Je tiens à remercier mes très chers parents qui m'ont soutenu non seulement durant mes études de maîtrise, mais aussi tout au long de ma vie. Vous êtes la base de mon existence dans la vie et la lumière qui illumine mon chemin. Merci à ma sœur Imene et son conjoint Hafid ainsi que mes nièces Miral et Urame, à mes frères Salah, et Zakaria avec qui je partage les moments difficiles loin de la famille.

Je tiens à remercier mes ami.e.s du monde universitaire notamment, Marc, Joanie et toute l'équipe de recherche avec qui j'ai partagé le bureau à la TÉLUQ, et la salle zoom pendant la fermeture de l'université à cause de la pandémie de la Covid-19. Merci pour les rencontres de motivation que nous avons tenues ensemble.

Finalement, je remercie toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce mémoire. À toi Hadjer spécialement, merci pour ton soutien et ton encouragement.

Merci à Sylvie Goulet, bibliothécaire des sciences de l'environnement, de l'atmosphère et de la terre à l'UQAM, pour son soutien dans la réalisation de la revue de la littérature. Merci à Jill Vandermeerschen du Service de consultation en analyses de données (SCAD) à l'UQAM, pour son aide dans la validation de la démarche d'analyses multivariées.

Merci à l'organisme Mitacs pour leur soutien financier très apprécié.

DÉDICACE

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ " أَنْ اشْكُرْ لِي وَلِوَالِدَيْكَ
إِلَى الْمَصِيرِ "

Je dédie ce travail à mes chers parents

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	viii
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES	xii
LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS	xv
RÉSUMÉ	xvi
ABSTRACT.....	1
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I PROBLÉMATIQUE	4
1.1 L'industrie pétrolière et gazière : survol des principaux enjeux.....	4
1.1.1 Importance économique	4
1.1.2 Principaux enjeux environnementaux	7
1.1.3 Principaux enjeux de santé et de sécurité.....	8
1.1.4 Principaux enjeux sociaux.....	9
1.2 Les phases du segment en amont de l'industrie pétrolière et gazière.....	11
1.2.1 La phase d'exploration.....	11
1.2.2 La phase d'exploitation	19
1.2.3 La phase post-exploitation	24
1.3 Aspects législatifs et réglementaires entourant l'exploration et à l'exploitation des hydrocarbures pétroliers et gaziers au niveau provincial.....	36
1.4 La situation des puits de pétrole et de gaz inactifs au Québec	40
1.4.1 Données disponibles	41
1.4.2 Mobilisations citoyennes entourant la question des puits inactifs	41
1.4.3 Le cas de la Montérégie	43
1.5 Question de recherche.....	44

1.6	Objectifs de la recherche	45
CHAPITRE II CADRE THÉORIQUE		47
2.1	Les approches écosystémiques de la santé	47
2.1.1	La pensée systémique.....	49
2.1.2	La transdisciplinarité.....	50
2.1.3	La participation	51
2.1.4	La durabilité	52
2.1.5	L'équité sociale et de genre.....	53
2.1.6	Du savoir à l'action	54
2.2	La vulnérabilité.....	56
2.2.1	L'exposition	56
2.2.2	La sensibilité	57
2.2.3	La capacité d'adaptation	58
2.2.4	Les facteurs de vulnérabilité	58
CHAPITRE III MÉTHODOLOGIE		60
3.1	La zone d'étude.....	62
3.2	Logiciels	63
3.3	Variables à l'étude et sources de données	64
3.3.1	Sources de données	64
3.4	Cartographie des variables à l'étude.....	73
3.4.1	Création de la base de données des puits de pétrole et de gaz inactifs ...	73
3.4.2	Analyse spatio-temporelle des forages pétroliers et gaziers	74
3.4.3	Création des zones tampons et méthodes d'analyse	74
3.5	Analyses de données multivariées.....	77
3.5.1	Analyse en composantes principales (ACP)	77
3.5.2	La classification ascendante hiérarchique (CAH).....	80
CHAPITRE IV RÉSULTATS		82
4.1	Cartographie des variables à l'étude.....	83
4.1.1	Données relatives aux puits de pétrole et de gaz inactifs.....	83
4.1.2	Analyse spatio-temporelle des puits inactifs.....	84
4.1.3	Cartographie de l'environnement naturel.....	88
4.1.4	Cartographie de l'environnement bâti.....	96
4.1.5	Cartographie de l'environnement humain.....	103

4.2	Résultats des analyses de données multivariées	110
4.2.1	Analyse en composantes principales (ACP)	110
4.2.2	La classification ascendante hiérarchique (CAH).....	119
CHAPITRE V DISCUSSION.....		122
5.1	Données relatives aux puits inactifs	122
5.2	Cartographie des variables à l'étude.....	125
5.2.1	Environnement naturel	125
5.2.2	Eau de surface	128
5.2.3	Zones agricoles.....	129
5.2.4	Réseau ferroviaire	132
5.2.5	Établissements scolaires.....	133
5.2.6	Hôpitaux.....	134
5.2.7	Densité de la population.....	135
5.2.8	Densité des enfants de moins de 5 ans	136
5.3	Analyse de données multivariées.....	137
5.3.1	Analyse en composantes principales (ACP)	137
5.3.2	La classification ascendante hiérarchique (CAH).....	139
5.4	Forces et limites de la recherche.....	142
5.4.1	Forces de la recherche	142
5.4.2	Limites de la recherche	147
CONCLUSION.....		148
ANNEXE A LISTE DES COMPAGNIES ET DES OPÉRATEURS AYANT EFFECTUÉ DES TRAVAUX DE FORAGE PÉTROLIER OU GAZIER DANS LA RÉGION DE LA MONTÉRÉGIE		151
BIBLIOGRAPHIE		153

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
1.1 Schéma montrant les principaux éléments d'une plateforme de forage ainsi que le circuit hydraulique de la boue de forage	13
3.1 Démarche méthodologique	61
3.2 Localisation géographique de la région de la Montérégie et ses MRC	62
3.3 Position des puits inactifs avec leurs zones tampons par rapport aux variables de la cartographie	76
4.1 Évolution des forages pétroliers et gaziers de la Montérégie par décennie.	86
4.2 Distribution des puits artésiens de la Montérégie	88
4.3 Position des puits de pétrole et de gaz inactifs par rapport aux puits artésiens de la Montérégie	89
4.4 Principaux cours d'eau de la Montérégie	91
4.5 Position des puits de pétrole et de gaz inactifs par rapport aux cours d'eau de la Montérégie	92
4.6 La répartition des zones agricoles de la Montérégie	94
4.7 Position des puits de pétrole et de gaz inactifs par rapport aux zones agricoles de la Montérégie	95
4.8 Réseau ferroviaire de la Montérégie	96

4.9	Position des puits de pétrole et de gaz inactifs par rapport aux chemins de fer de la Montérégie.....	97
4.10	Position des puits de pétrole et de gaz inactifs par rapport aux établissements d'enseignement préscolaires, primaires et secondaires de la Montérégie.....	99
4.11	Localisation des hôpitaux de la Montérégie	101
4.12	Position des puits de pétrole et de gaz inactifs par rapport aux hôpitaux de la Montérégie.....	102
4.13	Répartition de la population montréalaise sur le territoire de la Montérégie.....	103
4.14	Position des puits de pétrole et de gaz inactifs en fonction de la densité de la population en Montérégie	105
4.15	Répartition des enfants de moins de 5 ans de la Montérégie	107
4.16	Position des puits de pétrole et de gaz inactifs en fonction de la densité des enfants de moins de 5 ans en Montérégie.....	109
4.17	Graphique des valeurs propres	111
4.18	Projection des facteurs après rotation Varimax sur les axes D1 et D2.....	117
4.19	Projection des facteurs après rotation Varimax sur les axes D1 et D3.....	118
4.20	Projection des facteurs après rotation Varimax sur les axes D1 et D4.....	119
4.21	Projection des classes de puits de pétrole et de gaz inactifs.....	121
4.22	Graphique des observations de l'ACP indiquant les classes obtenues par la CAH.....	121

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
1.1 Synthèse des effets sur les écosystèmes pouvant survenir au cours des opérations pétrolières et gazières.....	33
3.1 Tableau des métadonnées	65
3.2 Liste des codes associés aux variables utilisées pour l'ACP.....	79
4.1 Répartition des puits de pétrole et de gaz inactifs selon leurs profondeurs	84
4.2 Nombre de puits de pétrole et de gaz forés par décennie	85
4.3 Données relatives aux puits de pétrole et de gaz inactifs forés dans la région de la Montérégie entre 1900-2010.....	87
4.4 Position des puits de pétrole et de gaz inactifs par rapport aux puits artésiens	90
4.5 Position des puits de pétrole et de gaz inactifs par rapport au fleuve Saint-Laurent	92
4.6 Position des puits de pétrole et de gaz inactifs par rapport aux cours d'eau	93
4.7 Position des puits de pétrole et de gaz inactifs par rapport aux zones agricoles.....	95

4.8	Position des puits de pétrole et de gaz inactifs par rapport aux chemins de fer.....	97
4.9	Les établissements scolaires de la Montérégie selon les niveaux d'enseignement.....	98
4.10	Position des puits de pétrole et de gaz inactifs par rapport aux établissements d'enseignement préscolaires, primaires et secondaires.....	100
4.11	Position des puits de pétrole et de gaz inactifs par rapport aux hôpitaux....	102
4.12	Répartition de la population montréalaise en fonction des aires de diffusions	104
4.13	Position des puits de pétrole et de gaz inactifs par rapport à la répartition de la population en Montérégie	106
4.14	Répartition des enfants de moins de 5 ans sur le territoire de la Montérégie en fonction des aires de diffusion	108
4.15	Position des puits de pétrole et de gaz inactifs par rapport à la répartition des enfants de moins de 5 ans en Montérégie.....	109
4.16	Résultats du test KMO et test de Bartlett.....	110
4.17	La variance totale expliquée	112
4.18	Liste des codes associés aux variables utilisées pour l'ACP	113
4.19	Corrélations initiales entre les variables et les facteurs	114
4.20	Pourcentage de la variance après rotation Varimax	115
4.21	Corrélations entre les variables et les facteurs après rotation Varimax.....	116

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

AD	Aire de diffusion
APGQ	Association pétrolière et gazière du Québec
AQLPA	Association québécoise de lutte contre la pollution atmosphérique
BAPE	Bureau d'audiences publiques sur l'environnement
BDTQ	Base de données topographiques du Québec
BTEX	Benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes
Cd	Cadmium
CO ₂	Dioxyde de carbone
COV	Composés organiques volatils
CPTAQ	Commission de protection du territoire agricole du Québec
GES	Gaz à effet de serre
GNL	Gaz naturel liquéfié
GOR	<i>Gas oil ratio</i>

HAP	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
H ₂ S	Sulfure d'hydrogène
INSPQ	Institut national de santé publique du Québec
LQE	Loi sur la qualité de l'environnement
MAPAQ	Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation
MDDELCC	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MDDEP	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs
MEES	Ministère de l'Éducation et de l'Enseignement supérieur
MELCC	Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MERN	Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles
MIDI	Ministère de l'Immigration, de la Diversité et de l'Intégration
MRC	Municipalité régionale de comté
MSSS	Ministère de la Santé et des Services sociaux
MTQ	Ministère des Transports du Québec
NO _x	Oxydes d'azote
PACES	Projets d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines
PIB	Produit intérieur brut

PM _{2,5}	Particules fines dont le diamètre médian est < 2,5 µm
RVHQ	Regroupement vigilance hydrocarbures Québec
SIG	Système d'information géographique
SIGPEG	Système d'information géoscientifique pétrolier et gazier
SOx	Oxydes de sulfure
UNEP	Programme des Nations unies pour l'environnement

LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS

hab./km ²	Habitant.e au kilomètre carré
m	Mètre
M	Million
K	Mille
km ²	Kilomètre carré
pi	Pied

RÉSUMÉ

L'augmentation de la demande mondiale en énergie a conduit à une exploitation massive des hydrocarbures pétroliers et gaziers. En raison de leur disponibilité et de leur faible prix, par rapport aux autres sources d'énergies renouvelables, les hydrocarbures fossiles demeurent la source d'énergie la plus demandée au monde. Cependant, les impacts environnementaux et sanitaires des puits de pétrole ou de gaz sont multiples. En effet, ces impacts sont susceptibles de survenir pendant toutes les phases du cycle de vie des puits. Dans cette étude nous étudions les enjeux environnementaux et sanitaires associés à la phase post-exploitation, c'est-à-dire aux puits inactifs.

Avec un potentiel de ressources quasiment nul, les puits de pétrole et de gaz inactifs sont généralement abandonnés par les compagnies sans tenir compte des effets indésirables sur l'environnement et sur la santé humaine que pourraient causer ces installations. En Montérégie, nous comptons 133 puits inactifs qui ont été forés entre 1900 et 2010. Dans le cadre de cette étude, nous avons trois objectifs principaux. Tout d'abord, nous dressons un portrait de l'évolution spatio-temporelle des forages pétroliers et gaziers réalisés dans cette région. Ensuite, nous analysons la vulnérabilité des milieux naturels, bâtis et humains face à la présence des puits inactifs. Enfin, nous proposons une classification des puits inactifs selon leurs profils.

Nous avons commencé par cartographier la position géographique des puits inactifs forés en Montérégie. Ensuite, nous avons produit huit cartes montrant la position des puits inactifs par rapport aux variables de la cartographie identifiées à partir d'une analyse de la littérature portant sur des études similaires. La cartographie sur une zone tampon de 1000 m nous a permis de compter le nombre de variables présentes autour de chaque puits inactif. Ces résultats ont été ensuite analysés par la méthode d'analyse en composantes principales (ACP) et la classification hiérarchique ascendante (CAH), dans le but de classer les puits inactifs selon leurs profils.

Les résultats de la cartographie ont montré que plusieurs puits de pétrole et de gaz inactifs se trouvent proches de puits artésiens, de cours d'eau notamment le fleuve Saint-Laurent, de champs agricoles, d'établissements scolaires et de quartiers résidentiels. D'autre part, l'ACP et la CAH ont permis de classer les puits selon trois profils différents. Cette classification pourrait être utilisée par les autorités locales pour

identifier les puits qui représentent plus de risques sur l'environnement et sur la santé humaine. Pour les futures recherches, nous recommandons d'inclure plus de variables à la cartographie de la vulnérabilité, notamment les résultats d'inspections, et d'effectuer une étude de terrain afin d'assurer une participation des parties prenantes dans la compréhension du problème.

Mots clés : vulnérabilité, écosystème, cartographie, puits inactifs, pétrole, gaz, santé humaine, environnement, puits abandonnés, Montérégie.

ABSTRACT

The increasing global demand for energy has led to massive exploitation of oil and gas hydrocarbons. Due to their availability and low price, compared to other renewable energy sources, fossil hydrocarbons remain the most demanded energy source in the world. However, the environmental and health impacts of oil or gas wells are multiple. Indeed, these impacts are likely to occur during all phases of the well life cycle. In this study, we study the environmental and health issues associated with the post-exploitation phase, that is to say with inactive wells.

With near-zero resource potential, inactive oil and gas wells are generally abandoned by companies without taking into account the adverse effects on the environment and on human health that these installations could cause. In Montérégie, we have 133 inactive wells that were drilled between 1900 and 2010. In the context of this study, we have three main objectives. First, we draw a portrait of the spatio-temporal evolution of oil and gas drilling carried out in this region. Then, we analyze the vulnerability of natural, built and human environments faced to the presence of inactive wells. Finally, we propose a classification of inactive wells according to their profiles.

We started by mapping the geographic position of inactive wells drilled in Montérégie. Next, we produced eight maps showing the position of inactive wells relative to mapping variables identified from a literature review of similar studies. Mapping over a 1000 m buffer zone allowed us to count the number of variables present around each inactive well. These results were then analyzed by the method of principal component analysis (PCA) and ascending hierarchical classification (AHC), with the aim of classifying inactive wells according to their profiles

The mapping results showed that several inactive oil and gas wells are located near artesian wells, rivers including the St. Lawrence River, agricultural fields, schools and residential areas. On the other hand, the PCA and the AHC have made it possible to classify the wells according to three different profiles. This classification could be used by local authorities to identify wells that pose more risks to the environment and to human health. For future research, we recommend including more variables in the vulnerability mapping, including inspection results, and conducting a field study to ensure stakeholder participation in understanding the problem.

Keywords : vulnerability, ecosystem, mapping, inactive wells, oil, gas, human health, environment, abandoned wells, Montérégie.

INTRODUCTION

L'industrie pétrolière et gazière est considérée parmi les activités économiques les plus rentables au monde. Au début du XIXe siècle, une véritable course a eu lieu entre les états afin d'explorer de nouveaux gisements d'hydrocarbures qui leur permettraient de se passer de l'importation de cette matière stratégique, qui était alors appelée l'or noir. À cette époque, l'aspect environnemental n'était pas pris en compte ni par les compagnies pétrolières, ni par les gouvernements. D'ailleurs, ce n'est que vers les années 1930 que les lois protégeant l'environnement de l'industrie pétrolière ont vu le jour dans plusieurs pays.

Par conséquent, de nombreux problèmes environnementaux ont été associés à l'exploration et l'exploitation des hydrocarbures. Les études ont confirmé que la dégradation de l'environnement due aux activités pétrolières et gazières peut avoir de nombreux impacts négatifs sur la santé humaine en raison de la relation étroite entre l'être humain et son environnement (Ajayi *et al.*, 2009; Ana *et al.*, 2009; D'Andrea et Reddy, 2014b; Nriagu, 2011; Nriagu *et al.*, 2016). Cependant, la phase post-exploitation du cycle de vie des puits de pétrole et de gaz est également susceptible d'avoir des effets considérables sur les écosystèmes. Si le nombre de puits inactifs est évidemment en augmentation partout dans les pays où ont eu lieu des travaux d'extraction des hydrocarbures, leurs effets sur l'environnement et sur la santé humaine restent encore peu documentés.

En effet, le nombre de puits de pétrole et de gaz inactifs au Canada a augmenté rapidement ces dernières années, notamment dans les provinces de l'Ouest, ce qui s'avère être un véritable problème pour le gouvernement fédéral. En avril 2020, le gouvernement canadien a accordé une aide financière de 1,72 milliard de dollars pour

l'assainissement et la réhabilitation des puits déjà épuisés appartenant à des entreprises dissoutes ou ayant des difficultés financières. Ce financement a été accordé à certaines provinces (Alberta, Saskatchewan et Colombie-Britannique) qui possèdent un grand nombre de puits inactifs (91 000 en Alberta, 36 000 en Saskatchewan et 12 000 en Colombie-Britannique). Pour ce faire, les autorités fédérales avaient demandé aux autorités des provinces bénéficiaires d'identifier les puits inactifs à réparer selon leur degré de risque (Gouvernement du Canada, 2020a).

La situation au Québec n'est pas très différente de celle des autres provinces, même si le nombre des puits inactifs demeure inférieur à celui des autres provinces. Selon les dernières statistiques, le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) du Québec a annoncé qu'il existe au moins 920 puits qui ont été forés sur le territoire de la province, dont 790 possèdent le statut inactif (MERN, 2019d). Cependant, la gestion de ce dossier par le gouvernement n'est pas à la hauteur des attentes de la population québécoise. D'ailleurs nous avons assisté ces dernières années à plusieurs mobilisations citoyennes demandant au gouvernement de procéder à une inspection rigoureuse des puits inactifs, tout en réparant ceux qui posent un risque pour l'environnement, la santé et la sécurité humains (Filteau, 2018; Salvace, 2018). Par conséquent, les puits inactifs sont devenus un sujet d'actualité au Québec. L'intérêt public pour cette question était logique en raison de la proximité des puits inactifs par rapport au fleuve Saint-Laurent, à des cours d'eau, à des champs agricoles, à des zones résidentielles et à de certaines infrastructures. La situation alarmante des puits inactifs au Québec et l'intérêt que cette question suscite dans les cercles sociaux nous ont amenés à nous pencher sur ce problème dans le cadre de ce projet de maîtrise.

Parmi les études qui cherchent à caractériser les impacts de l'exploration et l'exploitation des hydrocarbures, les effets sur la qualité de l'environnement et sur la santé humaine de la phase post-exploitation ont reçu peu d'attention. Dans le cadre de ce projet, nous nous interrogerons sur les enjeux environnementaux et sanitaires relatifs aux puits de pétrole et de gaz inactifs. Pour cela, nous avons choisi comme zone d'étude

la région de la Montérégie. Notre étude a comme premier objectif de dresser un portrait de l'évolution des forages pétroliers et gaziers qui ont eu lieu dans cette région pendant la période allant de 1900 jusqu'à 2010. Notre deuxième objectif concerne la cartographie de la vulnérabilité des environnements naturels, bâtis et humains. Enfin, le troisième objectif consiste à classer les puits inactifs de la Montérégie selon leurs profils.

Afin d'y arriver, il est nécessaire de commencer par une mise en contexte des enjeux environnementaux, sanitaires et sociaux des phases du segment amont de l'industrie pétrolière et gazière (activités sismiques, forage, exploitation et post-exploitation). Ensuite, nous présentons notre question de recherche et nos objectifs. C'est l'objet de notre premier chapitre. Le chapitre qui suit évoque les théories qui nous ont guidés pour développer notre démarche méthodologique et les outils pour la collecte et l'analyse de données. Le troisième chapitre présente la démarche méthodologique adoptée afin de répondre à notre question de recherche. Le quatrième chapitre expose les résultats de notre étude de cas. Enfin, le dernier chapitre discute des résultats présentés au chapitre précédent.

CHAPITRE I

PROBLÉMATIQUE

Ce chapitre présente un survol des enjeux économiques, environnementaux, sociaux et sanitaires de l'industrie pétrolière et gazière. Ensuite, nous abordons les différentes activités du segment en amont de l'industrie pétrolière et gazière en décrivant le processus de chacune des activités, ainsi que les enjeux environnementaux, sanitaires et sociaux qui y sont associés. Dans la troisième section, nous analysons les lois et règlements en vigueur depuis le début des opérations pétrolières et gazières au Québec jusqu'à la récente Loi sur les hydrocarbures. La quatrième section comprend une brève description de la situation des puits de pétrole et de gaz inactifs au Québec et en Montérégie plus spécifiquement. Enfin, nous présentons notre question de recherche et nos objectifs pour ce mémoire, dans la cinquième et sixième section respectivement.

1.1 L'industrie pétrolière et gazière : survol des principaux enjeux

Dans cette section, nous verrons l'importance économique de l'industrie pétrolière et gazière au niveau mondial, au Canada et au Québec, ainsi que les principaux enjeux environnementaux, sociaux et sanitaires qui y sont associés.

1.1.1 Importance économique

Depuis des décennies, les hydrocarbures fossiles occupent une place importante dans notre vie. En effet, la majorité de nos activités quotidiennes ont un lien, à un degré ou

à un autre, avec cette ressource non renouvelable. Au début, les hydrocarbures ont été utilisés à des fins domestiques, domaines d'utilisation qui ont ensuite été étendus au transport, à la production pharmaceutique, de plastiques et d'engrais et à bien d'autres domaines (Mousseau, 2008). Cette dépendance a donné à l'industrie pétrolière un pouvoir presque monopolistique sur l'économie mondiale.

Au niveau mondial, les hydrocarbures ont joué un rôle très important dans le développement des sociétés (Lafrance, 2002). Ils ont été le principal facteur de la révolution industrielle, et jusqu'à ce jour, l'économie mondiale demeure étroitement liée à ces hydrocarbures. En effet, le développement croissant que l'humanité a connu depuis le début de l'Anthropocène a conduit à une augmentation de la demande mondiale en énergie. Cependant, les énergies fossiles, en raison de leur disponibilité et de leur potentiel énergétique élevé, restent la source d'énergie la plus utilisée au monde (Agence internationale de l'énergie (AIE), 2018). Parallèlement, d'autres sources d'énergie ont été utilisées ces dernières années, telles que les biocarburants et les énergies éolienne et solaire, mais l'efficacité énergétique et le problème de stockage (notamment pour l'énergie éolienne et solaire) constituent un obstacle majeur à leur développement (Odrů, 2013).

En effet, la circulation mondiale des produits pétroliers (plus de deux tiers des hydrocarbures extraits dans le monde font l'objet d'échanges commerciaux) et les surplus financiers générés par cette circulation ont favorisé le rôle des hydrocarbures comme accélérateur de la mondialisation (Semmoud, 2010). Par conséquent, la santé de l'économie mondiale est liée aux variations des prix de pétrole plus que tout autre facteur, d'autant plus que l'on savait par le passé que les conflits géopolitiques et les catastrophes naturelles affectaient les économies (Semmoud, 2010).

Au Canada, les ressources naturelles jouent un rôle de premier plan dans le développement du pays. On y trouve plusieurs ressources naturelles fossiles comme le

pétrole, le charbon, le gaz naturel et les minerais métallifères (Pawlowska-Mainville et Chapman, 2019). Avec d'importantes réserves pouvant atteindre 178 milliards de barils de pétrole, 58 trillions de pieds cubes de réserves en gaz naturel et 8% des réserves mondiales en uranium, le Canada se positionne comme un chef de file dans le marché mondial des énergies fossiles (Ressources naturelles Canada, 2019a). D'autre part, l'industrie pétrolière et gazière était le premier contributeur aux recettes publiques du pays avec des rentrées totalisant 14,8 milliards de dollars pour la période allant de 2013 à 2017 (Ressources naturelles Canada, 2019b). En matière de fiscalité, les activités relatives à l'extraction pétrolière et gazière ont versé presque la moitié des redevances fiscales publiques durant la période de 2005 à 2009, avec une moyenne de 5,5 milliards de dollars par an. Cette contribution a baissé considérablement depuis l'année 2010 pour atteindre environ 2 milliards de dollars en 2018, ce qui représentait alors 30% des recettes fiscales publiques (Ressources naturelles Canada, 2019b). En termes d'emploi, le même secteur embauche environ 169 358 personnes soit 0,9% du total des emplois au Canada selon les statistiques de 2018 (Ressources naturelles Canada, 2019b).

Au Québec, le premier puits foré à des fins d'extraction d'hydrocarbures fossiles date de 1860. Depuis, près de 920 puits ont été forés un peu partout dans la province (MERN, 2019e). Néanmoins, la production pétrolière et gazière a eu peu d'impact sur l'économie québécoise. En effet, il y a eu de nombreuses tentatives des compagnies pétrolières de trouver des réserves d'hydrocarbures conventionnels commercialisables, mais les résultats des activités d'exploration ont été majoritairement négatifs, apparemment en raison du faible potentiel du sous-sol québécois (Laliberté, 2002). À titre d'exemple, entre 1966 et 1976, l'exploitation des gisements de Pointe-au-Lac et de Saint-Flavien a permis d'extraire respectivement 2,4 milliards et 5,7 milliards de pieds cubes de gaz, alors que le Québec consomme environ 200 milliards de pieds cubes par an (González *et al.*, 2015). En 1984, la Société québécoise d'initiatives pétrolières (SOQUIP) a déposé un rapport résumant les travaux d'exploration effectués et confirmant que le Québec n'a qu'un faible potentiel d'hydrocarbures (González *et al.*, 2015). Cette

situation a conduit le Québec à importer des quantités importantes d'hydrocarbures pour combler ses besoins en énergie. En 2018, le pétrole consommé au Québec provenait des États-Unis (58%), de l'Ouest canadien (39%) et d'autres pays, principalement l'Algérie (3%) (MERN, 2019c). D'autre part, le gaz naturel provenait essentiellement de l'ouest du Canada et du nord-est des États-Unis (MERN, 2019b). Enfin, les importations de produits pétroliers (gaz naturel, pétrole brut, produits raffinés, etc.) du Québec ont conduit à un déficit estimé de 6 milliards de dollars de la balance commerciale du secteur de l'énergie, et ce malgré ses exportations d'électricité (Whitmore et Pineau, 2018).

En raison de son engagement en faveur du développement durable, le gouvernement du Québec a décidé, dans sa stratégie énergétique 2030, d'investir dans les énergies renouvelables, notamment l'hydroélectricité, l'éolien et la méthanisation, et de les développer selon les technologies modernes et de concevoir un plan visant à réduire la dépendance du secteur industriel aux hydrocarbures (Gouvernement du Québec, 2016).

1.1.2 Principaux enjeux environnementaux

L'exploration et l'exploitation des hydrocarbures pétroliers et gaziers peuvent avoir des impacts négatifs sur l'environnement. Ceux-ci sont susceptibles de survenir à toutes les étapes des activités d'exploration et d'exploitation. En effet, l'industrie pétrolière se divise en trois grands segments : le segment en amont qui comprend les activités sismiques, l'exploration et l'exploitation ; le segment intermédiaire qui commence par le traitement initial des hydrocarbures, le transport (routier, ferroviaire ou maritime), puis le stockage et la commercialisation du produit brut ; enfin, le segment en aval qui comprend le raffinage et la distribution des produits pétroliers raffinés (Campbell, 2016).

De nombreux effets négatifs sur l'environnement sont associés au segment en amont, notamment la perturbation de la faune et la flore, le déversement de produits chimiques

et de pétrole, ainsi que le risque de contamination des eaux souterraines et de surface (Aba et Kavak, 2019; McMahon *et al.*, 2018; Wisen *et al.*, 2020).

Pendant le segment intermédiaire, les risques les plus importants concernent les déversements causés par les accidents lors du transport routier, ferroviaire ou maritime des hydrocarbures, ainsi que le risque d'explosion et de fuites des pipelines (Aba et Kavak, 2019; Addy *et al.*, 2016; Elkin, 1968).

Enfin, dans le segment en aval, l'émission des gaz à effet de serre (GES) constitue le principal phénomène pouvant survenir soit durant le processus de raffinage des hydrocarbures, soit en utilisant les produits raffinés (industrie et transport) (Elkin, 1968). Comme nous nous intéressons uniquement aux activités qui se passent au niveau des puits (les travaux sismiques, l'exploration, l'exploitation et la phase post-exploitation), les enjeux environnementaux relatifs au segment en amont seront présentés plus en détail dans la section 1.2.

1.1.3 Principaux enjeux de santé et de sécurité

Étant donné que la santé humaine est étroitement liée à la santé de l'environnement, tout impact négatif sur la qualité de ce dernier affectera directement la santé humaine (Lebel, 2003). En fait, les effets néfastes de l'industrie pétrolière ne s'arrêtent pas uniquement à l'environnement, ils ont des conséquences graves non seulement sur la santé des travailleurs et travailleuses, mais aussi sur la santé de la population en général.

Le segment en amont du cycle de vie d'un puits de pétrole ou de gaz comporte des risques importants pour la santé et la sécurité des personnes travaillant dans cette industrie ou vivant à proximité. En fait, les travailleurs et travailleuses font face à de nombreux risques notamment l'intoxication par les gaz toxiques contenus dans le sous-sol comme le sulfure d'hydrogène (H₂S), les explosions et les incendies (Chevalier *et al.*, 2015). De même, une contamination des eaux souterraines et de surface causée par

des fuites susceptibles de survenir au cours ou après le forage pourrait poser des risques sur la santé des consommateurs (Chevalier *et al.*, 2015).

Le segment intermédiaire comporte de son côté des risques importants sur la santé des personnes notamment en cas d'accident de camion ou de train transportant les hydrocarbures. Ce dernier est susceptible de causer des incendies, comme il présente également de graves conséquences en cas d'accident de navire à l'instar des déversements de Prestige, Erika et d'autres. D'un autre côté, le transport par pipeline constitue une menace pour la sécurité des personnes lorsque le réseau de transport passe près des zones urbaines ou des territoires autochtones (UNEP, 1997).

Les risques associés au segment aval constituent principalement les émissions des GES. En effet, le raffinage et la combustion des produits pétroliers raffinés émettent d'énormes quantités de GES, ce qui contribue au réchauffement climatique. De plus, les émanations des raffineries conduisent à la production de la pluie acide qui contamine par la suite les eaux de surface (Amadi, 2014).

1.1.4 Principaux enjeux sociaux

En plus des effets environnementaux et sanitaires, les hydrocarbures peuvent avoir des impacts aux niveaux économique et social. En effet, le fait d'avoir des réserves pétrolières ou gazières ne signifie pas nécessairement que le pays a une économie forte (Sarkis, 1971). Par exemple, malgré leur immense potentiel en ressources naturelles, des pays producteurs d'hydrocarbures en Afrique, au Moyen-Orient et en Amérique latine sont majoritairement parmi les pays les moins avancés (Maurice *et al.*, 2001). De plus, la fluctuation des prix du pétrole et de gaz affecte directement le niveau de vie des pays dont l'économie est principalement centrée sur l'exportation des hydrocarbures (Maurice *et al.*, 2001).

D'autres impacts sur la qualité de vie sont associés aux activités reliées au secteur des hydrocarbures. On recense notamment la perturbation par le bruit, la circulation des engins, les vibrations et la luminosité intense causant des nuisances pour les personnes habitant à côté des chantiers de travaux (Chevalier *et al.*, 2015). De plus, d'autres études ont confirmé que plusieurs problèmes sociaux sont susceptibles de se produire lorsque les travailleurs déménagent dans les villes près des zones d'extraction des hydrocarbures. Ceci peut engendrer une hausse de la demande en services sociaux et services essentiels (éducation, services de soin, sécurité civile, etc.) résultants d'une croissance démographique. Cette croissance peut également engendrer des problèmes socioéconomiques tels qu'une pénurie de logements, une augmentation des loyers et des impacts négatifs sur le tissu social, notamment une hausse de la criminalité et des changements du mode de vie des communautés locales (Bouchard-Bastien et Gervais, 2016; Chevalier *et al.*, 2015). D'autres études ont confirmé que l'augmentation de la circulation dans les villes proches des sites d'extraction des hydrocarbures a causé une détérioration des routes locales accompagnée d'une hausse du taux d'accidents de route et un changement dans les habitudes de déplacement des communautés locales (Bouchard-Bastien et Gervais, 2016).

Des études ont été réalisées auprès des communautés ayant été impliquées dans des projets d'extraction des hydrocarbures, et celles-ci ont confirmé que ce type d'industries augmente la possibilité de déclenchement des conflits sociaux. Le plus souvent, il s'agit de groupes de citoyens locaux qui s'opposent à l'exploitation des hydrocarbures sous prétexte de défendre les droits de l'environnement (Bouchard-Bastien et Gervais, 2016). En effet, l'acceptabilité sociale est devenue l'une des grandes barrières auxquelles font face, non seulement les projets extractivistes, mais bien d'autres projets de 'développement' (Batellier et Maillé, 2017). D'ailleurs, les dernières années, des centaines de projets ont été annulés à la suite d'oppositions citoyennes. On y trouve notamment deux événements survenus au Québec. Le premier est survenu en 2011, lorsque la société québécoise a tourné le dos à l'exploitation des

gaz schiste dans la Vallée du Saint-Laurent et en Gaspésie en annulant le projet pour cause de forte pression citoyenne (Batellier et Maillé, 2017). Le deuxième événement concerne le projet GNL Québec à Saguenay. De nombreuses manifestations en opposition à ce projet se tiennent dans les rues des grandes villes du Québec, et ce, avant même la divulgation des résultats des audiences du Bureau d'audiences publiques sur l'environnement (BAPE) (Gauthier, 2020; Lessard, 2020; Radio-Canada, 2020b; Shields, Alexandre 2020).

1.2 Les phases du segment en amont de l'industrie pétrolière et gazière

Dans le cadre de ce travail, nous nous intéressons uniquement aux opérations pétrolières et gazières situées en milieu terrestre. Nous avons choisi de nous concentrer sur les trois phases du segment en amont de l'industrie pétrolière et gazière, c'est-à-dire l'exploration, l'exploitation et la phase post-exploitation. Pour chacune de ces phases, les enjeux environnementaux, sanitaires et sociaux seront détaillés dans la présente section.

1.2.1 La phase d'exploration

Dans l'industrie pétrolière, la phase d'exploration se divise en deux étapes : 1) les opérations sismiques qui servent à donner une image structurale du site, et donc à estimer la présence de réservoirs d'hydrocarbures, et 2) les opérations de forage qui consistent à creuser un trou dans la formation afin de confirmer ou d'infirmer la présence des hydrocarbures (UNEP, 1997).

En bref, la première étape de la phase d'exploration se concentre sur les études géophysiques et a pour but de produire une image structurale de la zone. Trois types de levés géophysiques sont utilisés : les techniques magnétiques, gravimétriques et sismiques de réflexion (Assaad, 2008) cité par (Malo *et al.*, 2015). La méthode la plus utilisée est celle des levés sismiques. Le principe de cette méthode est simple, il s'agit

d'envoyer des ondes magnétiques provoquées en surface, le plus souvent générées par les vibrations de camions géants, des « camions-vibreurs », mais dans certains cas les entreprises utilisent des charges de dynamite placées dans des trous creusés en surface. Les ondes envoyées remontent ensuite vers la surface où elles seront détectées par des capteurs (Cossé, 1988). Ce processus permet d'enregistrer la vitesse et le temps de propagation des ondes dans la formation. Sur la base de ces données, il est possible d'estimer la présence de pièges d'hydrocarbures, l'épaisseur et les caractéristiques pétrophysiques des couches traversées (Malo *et al.*, 2015).

Après avoir déterminé l'emplacement présumé des hydrocarbures, l'étape suivante consiste à creuser un trou dans le sol, ce qu'on appelle le forage pétrolier. L'objectif de cette phase est de confirmer avec certitude la présence des hydrocarbures et la profondeur du réservoir (UNEP, 1997). Cette opération présente beaucoup de risques pour les écosystèmes. Au cours des opérations de forages qui peuvent durer de un à trois mois (parfois plus), le risque de déversements soit de produits chimiques ou d'hydrocarbures est très élevé (UNEP, 1997). D'ailleurs les grands déversements dans le monde sont survenus pendant la phase de forage, comme ce fut notamment le cas pour les plate-formes Deepwater Horizon en 2010 et Ixtoc I en 1979 (Archambault et Toussaint, 2016).

Durant la phase de forage, il est nécessaire de faire circuler un fluide dont les fonctions principales sont d'exercer une pression dans le trou pour éviter l'irruption de fluides indésirables, lubrifier et refroidir l'outil de forage, ainsi qu'à remonter les déblais du fond jusqu'à la surface (Nguyen, 1993). Cependant, ce fluide, appelé aussi « boue de forage », est composé de plusieurs produits chimiques mélangés dans une solution à base d'huile ou à base d'eau. La boue qui remonte en surface doit subir un traitement pour éliminer les déblais en suspension avant d'être injectée de nouveau dans le puits (Nguyen, 1993). En parallèle à cette opération, le site de forage doit obligatoirement être équipé d'un ou plusieurs bassins appelés « bourbiers » pour le stockage des déblais

et/ou des surplus de boue. Ces bassins sont généralement creusés dans le sol et pourvus d'un couvercle imperméable pour protéger l'environnement de la toxicité de ces fluides (Nguyen, 1993). La Figure 1.1 montre les différents éléments d'un appareil de forage, ainsi que le circuit hydraulique de la boue de forage.

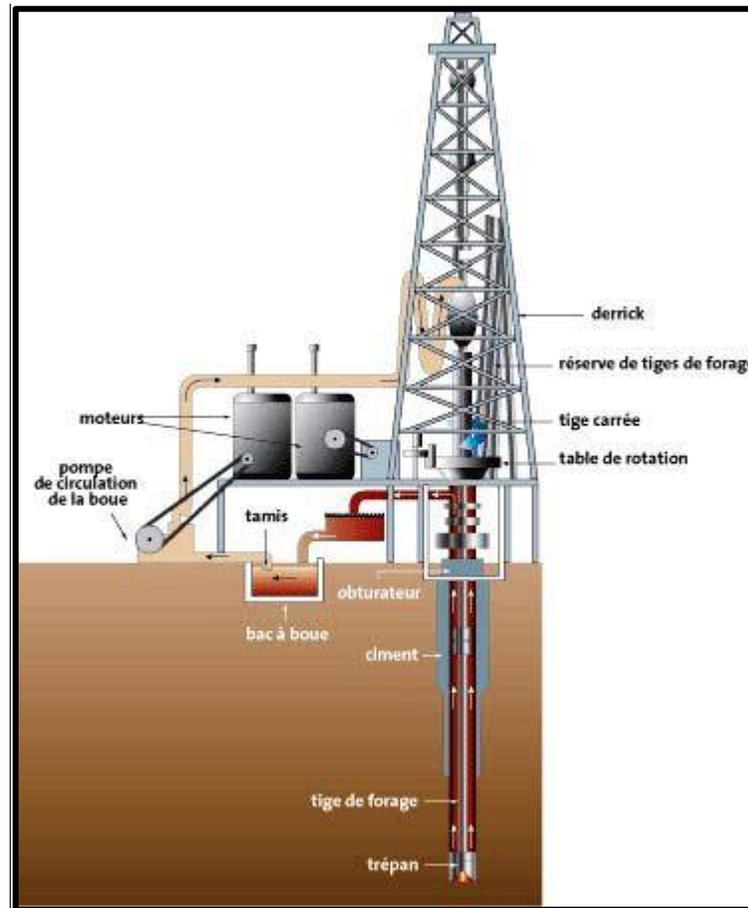


Figure 1.1 Schéma montrant les principaux éléments d'une plateforme de forage ainsi que le circuit hydraulique de la boue de forage (BRGM, s.d.).

Au fur et à mesure que l'outil de forage continue de pénétrer les couches de la terre, il est nécessaire d'installer des tubages en acier dans les sections traversées par le forage. Le rôle de ceux-ci est de maintenir l'intégrité du trou et ainsi isoler les formations souterraines les unes des autres (UNEP, 1997). Une fois la profondeur du réservoir

atteinte, les opérations de forage s'arrêtent et le puits entre dans une nouvelle phase. Si le réservoir contient des quantités d'hydrocarbures commercialisables, le puits sera donc équipé d'une tête de puits multivannes avant d'être connecté au réseau de collecte; sinon, le puits sera obstrué par des bouchons de ciment et le tubage sera coupé à une certaine distance sous le sol, allant généralement de 1 à 1,5 m (UNEP, 1997).

1.2.1.1 Enjeux environnementaux

L'exécution des travaux de levés géophysiques peut engendrer des problèmes environnementaux majeurs, notamment la déforestation pendant l'aménagement des chemins d'accès, la perturbation des écosystèmes par l'effet des vibrations et des explosifs et dans certains cas l'atteinte aux droits des peuples autochtones (UNEP, 1997). D'un autre côté, Nowacek et ses collaborateurs ont affirmé que les levés sismiques constituent la deuxième cause de perturbation des écosystèmes marins (Nowacek *et al.*, 2013) cité par (Archambault et Toussaint, 2016).

Des mesures ont été prises afin de réduire les risques associés aux levés géophysiques dans de nombreux pays comprennent des réglementations qui spécifient les distances entre la source sismique et les infrastructures à respecter, la nécessité d'entreprendre des travaux de réhabilitation et de remise en état des sites tels que le reboisement après la fin des opérations et l'utilité de partager les informations sismiques entre les compagnies pour éviter de refaire les travaux plusieurs fois (Malo *et al.*, 2015).

Quant aux impacts environnementaux associés aux opérations de forage, les fuites provenant des bourbiers constituent une réelle menace pour l'environnement et la santé humaine. L'exemple de l'Amazonie équatorienne avec la compagnie Chevron illustre bien le danger des déversements de boue dans la nature. En résumé, la compagnie Chevron avait exploité un gisement de pétrole situé sur les terres autochtones de 1964 à 1992. Pendant cette période, la compagnie Chevron a déversé 64 000 m³ de pétrole brut et 60 milliards de litres d'eau polluée dans les cours d'eau et dans le sol (Legard,

2014). L'entreprise n'a pas respecté les mesures employées dans l'industrie pétrolière qui consistent à stocker ces fluides en toute sécurité et à les traiter pour éliminer les produits chimiques avant de les déverser dans la nature. Aujourd'hui plus de 30 000 membres de ces communautés autochtones sont contaminés par les métaux lourds provenant de ce déversement (San-Sebastián et Karin Hurtig, 2004).

Les puits en forage peuvent présenter des fuites de fluides susceptibles de provoquer des problèmes à court et à long terme. Les problèmes à court terme sont majoritairement liés à une mauvaise exécution des travaux. Parfois, il s'avère que la boue utilisée lors du forage est incompatible avec les caractéristiques des fluides de formation, de sorte que la pression du fond du puits est supérieure à la pression exercée par la boue, ce qui provoque la migration de ces fluides vers la surface. D'autre part, la venue de fluides constitue une menace pour les formations terrestres, l'exemple du puits OKN32 à Hassi Berkine en Algérie, illustre le risque d'une venue non contrôlée. En bref, en 1978 la compagnie Total avait été mandatée par la Sonatrach pour forer un puits (OKN32) à 30 km de la ville d'Ouargla. Pendant le forage, il y a eu une éruption d'eau. La compagnie Sonatrach responsable de la logistique (selon les responsables de Total) avait livré le matériel nécessaire pour stopper la venue quinze jours plus tard. L'eau est entrée en contact avec une formation saline, ce qui a provoqué un effondrement sur le site et une augmentation de la salinité de l'eau souterraine. Aujourd'hui, la nappe phréatique est contaminée et les environs sont aussi menacés à cause de l'expansion de la contamination (Boris, 2013).

Enfin, au cours des opérations de forage, il peut y avoir des émissions de polluants dans l'atmosphère tels que les composés organiques volatils (COV), les particules fines (PM_{2.5}), des oxydes de soufre (SO_x) et des oxydes d'azote (NO_x). Ces contaminants proviennent principalement de la combustion des carburants utilisés pour le fonctionnement des différents engins employés lors du forage (pompes, génératrices, compresseurs, camions, etc.) (Chevalier *et al.*, 2015).

1.2.1.2 Enjeux sanitaires

Dans cette section, nous résumons les différents risques sanitaires pour les professionnels travaillant pendant la phase d'exploration de l'industrie pétrolière, ainsi que les effets sur la santé de la population qui en découlent. Pour ce faire, nous avons consulté le rapport publié en 2015 par l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) qui présente les enjeux de santé publique relatifs aux activités d'exploration et d'exploitation des hydrocarbures gazeux et pétroliers.

Enjeux de santé et sécurité au travail

La santé et la sécurité au travail couvrent l'ensemble des risques associés aux maladies pouvant nuire à la santé physique et psychique des travailleurs et des travailleuses. Les résultats de la revue de littérature effectuée par les experts de l'INSPQ (2015) ont confirmé que les risques chimiques constituent la majeure partie des nuisances. En effet, bien que l'étude de l'INSPQ ait été menée uniquement sur des personnes travaillant dans le milieu marin, nous pouvons confirmer que les personnes travaillant en milieu terrestre sont aussi exposées à des risques similaires, car le processus de forage, le matériel et les produits utilisés sont pratiquement les mêmes. Nous tenons à noter que la seule différence entre les deux milieux concerne davantage la santé mentale, étant donné que les personnes travaillant en milieu marin ont plus de facteurs de stress que les travailleurs en milieu terrestre (Bureau international du Travail, 2016).

Comme nous l'avons abordé précédemment, la boue de forage est constituée d'un nombre important de produits chimiques. Le contact des travailleurs et travailleuses avec la boue est susceptible de causer des irritations aux yeux et des voies respiratoires le plus souvent associées aux aérosols générés pendant la circulation et l'agitation de la boue. D'autres effets dermiques pourraient se manifester dans cette population en cas de contact avec la peau. De plus, ces personnes sont exposées au sulfure d'hydrogène et à d'autres matériaux radioactifs (Chevalier *et al.*, 2015). Enfin, les

travailleurs risquent des troubles musculaires, à cause de la manipulation des équipements de la sonde, et aux troubles auditifs à cause du bruit et des vibrations (Chevalier *et al.*, 2015).

Finalement, ces activités peuvent nuire à la santé mentale des travailleurs et travailleuses. En effet, ces personnes ont généralement des quarts de travail de 10 à 12 heures par jour en rotation (jour/nuit). La charge de travail et les changements d'horaires sont susceptibles de causer des effets psychologiques négatifs sur la santé de ces travailleurs et travailleuses tels que le stress, la perturbation de sommeil et des signes de fatigue (Chevalier *et al.*, 2015).

Enjeux de santé de la population

Les effets sur la santé de la population associés aux divers événements accidentels pouvant survenir au cours des opérations d'exploration sont résumés dans ce qui suit. En effets, les personnes habitant près des champs pétroliers font face à de nombreux problèmes sanitaires résultants des opérations des levés géophysiques, dont le bruit provoqué par les explosifs, le bruit des camions-vibreux et la pollution atmosphérique causée par la circulation des engins. Les conséquences sur la santé se traduisent par la perturbation du sommeil, des troubles auditifs tout au long de la période des opérations, des problèmes respiratoires sous forme d'irritations nasales et de gênes respiratoires (Chevalier *et al.*, 2015).

Les effets sur la santé de la population associés aux opérations de forage sont multiples et varient selon les types de contaminants et les voies d'exposition. Une contamination des eaux souterraines ou de surface destinées à la consommation humaine est susceptible de provoquer des problèmes sanitaires tels qu'une perturbation biochimique, cellulaire, génotoxique, enzymatique, mutagène ou cancérigène, des atteintes cutanées et des muqueuses, des atteintes neurologiques (troubles cognitifs,

vertiges) et des problèmes gastro-intestinaux (vomissements et nausées) (Chowdhury et al., 2009; Kpeglo et al., 2014) cité dans (Chevalier *et al.*, 2015)

D'autre part, le sol et les sédiments du voisinage peuvent être contaminés au cours des opérations de forage principalement par l'émission de plusieurs substances toxiques comme les BTEX (Benzène, Toluène, Éthylbenzène, Xylènes), les HAP et d'autres métaux comme le cadmium (Cd) (Chevalier *et al.*, 2015). Les effets sur la santé découlant de ce type de contaminants concernent essentiellement le potentiel cancérigène des HAP et des BTEX. Par ailleurs, le Cd est reconnu par sa toxicité à l'origine des maladies cardiovasculaires, rénales et osseuses (Ajayi *et al.*, 2009; Chinedu et Chukwuemeka, 2018).

L'exposition aux contaminants atmosphériques découlant des opérations de forage comme les NO_x, SO_x et les PM_{2.5} est susceptible d'engendrer des effets sanitaires tels que les problèmes cardio-respiratoires et la baisse des fonctions pulmonaires (Chevalier *et al.*, 2015). De plus, chez les enfants, il est possible de signaler une altération du développement des poumons et un développement de l'asthme (Health Effects Institute, 2010) cité dans (Chevalier *et al.*, 2015).

Quant aux effets sur la santé psychologique des populations habitant près des sites d'exploration pétrolière ou gazière, l'étude de Bouchard-Bastien et Gervais, publiée par l'INSPQ en 2016, dans laquelle elles ont documenté la *relation entre les activités de l'industrie des hydrocarbures, la qualité de vie et la santé psychologique et sociale* a révélé que le stress, l'anxiété et la colère étaient les principaux symptômes rapportés au sein de ces communautés.

1.2.1.3 Enjeux sociaux

Pour recenser les effets sociaux sur les communautés locales des travaux d'exploration, nous avons consulté le document de Bouchard-Bastien et Gervais (2016). En effet,

l'émergence de groupes de citoyens défendant les droits environnementaux en s'opposant aux activités d'exploration a été le principal facteur cité dans le corpus de documents analysés dans le cadre de cette étude (Bouchard-Bastien et Gervais, 2016). Un autre type d'opposition signalé concerne les propriétaires de terres agricoles qui s'opposent aux activités d'exploration à cause de la perte de valeur de leurs propriétés (Bouchard-Bastien et Gervais, 2016).

D'autre part, les autrices ajoutent les changements au mode de vie et aux habitudes des communautés (en particulier les communautés autochtones) aux nuisances associées aux activités d'explorations. De plus, l'implantation des projets d'extraction sans consultation publique peut affecter la confiance des citoyens envers les autorités locales (Bouchard-Bastien et Gervais, 2016).

À ces enjeux, nous ajoutons le risque de conflits sociaux entre les membres d'une même communauté dont la vision des enjeux diffère (Bouchard-Bastien et Gervais, 2016). Il est possible que certains groupes de la société soutiennent ces projets selon l'argument que cette industrie peut créer des emplois et générer des profits économiques pour le pays, et ce, dans le respect des valeurs environnementales. D'ailleurs, l'Association pétrolière et gazière du Québec (APGQ) continue de défendre les retombées économiques positives pour le Québec de l'exploitation des hydrocarbures fossiles.

1.2.2 La phase d'exploitation

La phase d'exploitation comprend la mise en production du puits de pétrole ou de gaz. Après avoir confirmé la présence de quantités commercialisables d'hydrocarbures, d'autres puits pourraient être forés dans le même champ (le nombre de puits est déterminé selon le potentiel du gisement) (UNEP, 1997). La mise en production du puits consiste à installer une tête de puits, appelée aussi '*l'arbre de Noël*', qui contient un ensemble de vannes permettant de contrôler le débit et la pression des fluides provenant du réservoir. Au début, les fluides (pétrole ou gaz) montent vers la surface

sous l'effet de la pression du fond, ce qu'on appelle 'drainage naturel'. Toutefois, le débit de production dépend de plusieurs paramètres à savoir la viscosité, le rapport gaz/huile (*GOR*) et la pression du fond et ceux, peuvent varier pendant la durée de vie du puits (UNEP, 1997). Une fois que le débit de production a diminué, les compagnies procèdent à la récupération secondaire en utilisant d'autres techniques afin de maximiser la production qui consistent à injecter de l'eau dans des puits voisins pour augmenter la pression du fonds, ou du gaz pour alléger le pétrole en diminuant sa viscosité (UNEP, 1997). De nouvelles techniques sont apparues dans les dernières années qui consistent à injecter la vapeur, provoquer une combustion *in situ* (dans le fond du puits), injection du CO₂ et bien d'autres technologies de récupération tertiaire.

1.2.2.1 Enjeux environnementaux

Les impacts sur l'environnement de la phase d'exploitation sont associés essentiellement aux risques de fuites. Les déversements au niveau des puits pendant la phase de production sont causés à la suite d'une perte d'intégrité d'un ou plusieurs éléments du puits. Le plus souvent, la corrosion est la principale cause des fuites au niveau des puits. Celle-ci peut former des orifices dans le tubage permettant aux fluides de s'échapper vers la surface en suivant les fissures dans les couches de la formation. Dans ce cas, il peut y avoir contamination du sol, dégradation de la végétation avoisinante ou contamination des eaux de surface (UNEP, 1997). Parfois, ces fluides s'infiltrent dans les aquifères, provoquant une contamination des eaux souterraines (Aba et Kavak, 2019; Jackson *et al.*, 2013; Osborn *et al.*, 2011a, 2011b).

Toutefois, d'autres impacts sur l'atmosphère peuvent survenir au cours de la période de production du puits. Dans certains cas, les puits sont équipés d'un séparateur *in situ*, c'est-à-dire un petit séparateur qui fait le traitement primaire du pétrole produit en éliminant les gaz en suspension. Les gaz émis sont soit brûlés par torchage, soit rejetés dans l'air, ce qui conduit à une pollution atmosphérique (Amadi, 2014; UNEP, 1997).

1.2.2.2 Enjeux sanitaires

L'exploitation des hydrocarbures pétroliers ou gaziers expose de nombreuses personnes à des risques sanitaires, plus particulièrement les travailleurs et travailleuses oeuvrant dans ce secteur et les populations vivant à proximité des sites d'extraction. Afin de recenser les effets sur la santé de ces populations, nous avons consulté le travail de synthèse réalisé par les experts de l'INSPQ (2015).

Enjeux de santé et sécurité au travail

Les risques pour la santé des travailleurs et travailleuses pendant l'exploitation des hydrocarbures sont moins importants que pendant la phase d'exploration. Le facteur qui diminue ces risques est le fait que les travailleurs et travailleuses ne sont pas présents en permanence sur le site et qu'ils font seulement des inspections aux puits en cas de problèmes ou à des fins de vérification. Cependant, ces personnes peuvent être exposées aux produits pétroliers ou gaziers en cas de fuites susceptibles de se produire au niveau de la tête de puits.

Les travailleurs et travailleuses exposés aux fuites des puits de pétrole ou de gaz peuvent développer des cancers, des irritations oculaires et respiratoires et des diarrhées (Ordinioha et Brisibe, 2013) cité dans (Chevalier *et al.*, 2015) . De plus, ces personnes sont confrontées à des risques cancérigènes, neurotoxiques, rénaux et hépatotoxiques en cas d'exposition aux métaux lourds (Ajayi et al., 2009)¹. Enfin, une fuite de gaz peut causer des maux de tête, des vertiges ou vomissements(Akinyede et al., 2006)².

¹*Idem.*

²*Idem.*

Enjeux de santé de la population

Pour les communautés installées à proximité des puits de pétrole et de gaz, les enjeux de santé peuvent survenir en lien avec plusieurs facteurs. En effet, les risques de déversements du pétrole suite à une fuite au niveau du puits peuvent conduire à une contamination des eaux souterraines ou de surface dont dépendent plusieurs communautés pour leur approvisionnement en eau potable. Ces eaux sont susceptibles d'être contaminées par des hydrocarbures lourds, des BTEX, des HAP, des COV ou des métaux lourds (Chevalier *et al.*, 2015). Cependant, les conséquences sur la santé humaine varient selon le type de contaminant et le type d'exposition. Bien qu'une personne puisse s'exposer aux eaux contaminées par inhalation, contacts cutanés, ingestion ou bien les trois à la fois, les atteintes sanitaires se manifestent sous forme des risques toxicologiques et cancérigènes, de risques neurotoxiques, hépatotoxiques et rénaux, des irritations de la gorge céphalées, des irritations oculaires des atteintes cutanées et des muqueuses et d'autres effets sanitaires indifférenciés (Agbalagba *et al.*, 2013; Amadi, 2014; Kpeglo *et al.*, 2014; Nriagu, 2011; Ordinioha et Brisibe, 2013; Zhang et Huang, 2011) cités dans (Chevalier *et al.*, 2015) (San-Sebastián et Karin Hurtig, 2004)

Quant aux effets sur la santé découlant d'une contamination des sols ou des sédiments suite à un déversement des produits pétroliers pendant l'exploitation, les études ont confirmé que les travailleuses et travailleurs sont les plus exposés en raison de leur proximité au site de déversement (Chevalier *et al.*, 2015). Cependant, cela peut impliquer d'autres personnes à savoir les bénévoles qui participent aux opérations de décontamination (Eom *et al.*, 2011; Pérez-Cadahía *et al.*, 2007) cités dans (Chevalier *et al.*, 2015).

Les préoccupations sanitaires concernent essentiellement les risques de développement des cancers, diarrhées, irritations oculaires, cutanées et respiratoires (Ordinioha et Brisibe, 2013) cité dans (Chevalier *et al.*, 2015). D'autre part, la présence des métaux pourrait présenter des risques cancérigènes, neurotoxiques rénaux et hépatotoxiques (Ajayi et al., 2009)³. D'autres atteintes sanitaires sont susceptibles de se manifester chez les personnes exposées, maladies auto-immunes et présence de métabolites toxiques (Lee et al., 2010; Schoenroth et Fritzler, 2004)⁴.

1.2.2.3 Enjeux sociaux

Les études confirment que les activités d'exploitation des hydrocarbures ont de nombreux effets sur les communautés vivant à proximité. En effet, le phénomène de *boomtown* (augmentation rapide de la taille des communautés) engendré par l'arrivée des travailleurs étrangers est susceptible de causer des conflits sociaux entre ces populations et les membres de la communauté d'accueil. De plus, ceci pourrait causer une pénurie ou une augmentation du prix des biens et des services sociaux (Bouchard-Bastien et Gervais, 2016). D'autres études indiquent que l'exploitation des hydrocarbures offre de nombreuses opportunités d'emplois. L'arrivée de ce type d'industrie s'est souvent accompagnée d'une augmentation des services commerciaux dans les communautés voisines (Bouchard-Bastien et Gervais, 2016).

Des études ont confirmé que les travailleurs peuvent avoir du mal à s'intégrer à la communauté d'accueil soit parce qu'ils la considèrent comme une résidence temporaire pour travailler, soit parce que la population locale ne les accepte pas. Cette dernière est susceptible de causer des conflits en plus de générer une sorte d'inégalité sociale (Bouchard-Bastien et Gervais, 2016).

³*Idem.*

⁴*Idem.*

En revanche, certaines études estiment que l'arrivée de travailleurs étrangers entraîne une augmentation du taux de criminalité dans les communautés proches des sites d'exploration (Bouchard-Bastien et Gervais, 2016).

Enfin, les déversements d'hydrocarbures qui peuvent survenir pendant l'exploitation présentent un risque pour la qualité du sol. Ceux-ci sont susceptibles d'affecter la situation économique des personnes dont les emplois sont liés au secteur agricole et à l'industrie du tourisme (Bouchard-Bastien et Gervais, 2016).

1.2.3 La phase post-exploitation

La phase post-exploitation comprend les opérations de fermeture du puits après l'épuisement des ressources. En effet, la période d'exploitation d'un champ pétrolier dépend de plusieurs paramètres. À l'époque, en raison des limites technologiques et matérielles, la durée de vie était très courte à cause de l'épuisement rapide des réserves d'hydrocarbures. Au fil du temps, grâce au développement des technologies de forage, d'autres puits de pétrole et de gaz ont été forés à des profondeurs beaucoup plus grandes que les anciens. Cette évolution a permis aux compagnies pétrolières d'aller chercher les hydrocarbures dans des formations plus profondes et donc de prolonger la durée de service des puits (Nguyen, 1993).

Quelle que soit la période d'exploitation d'un puits de pétrole ou de gaz, tout puits doit être fermé après l'épuisement des hydrocarbures. Il existe toutefois des exceptions : dans certains cas, un puits peut être fermé suite à une perte d'intégrité, à une détérioration de l'état de sa tête ou à cause du vandalisme (Prasetya et Herputra, 2018).

La fermeture d'un puits consiste à injecter des bouchons de ciment à l'intérieur de celui-ci pour empêcher les fluides contenus dans la formation à migrer vers la surface et éviter la contamination des eaux souterraines et de surface ou tout autre problème environnemental (Barclay *et al.*, 2001). Compte tenu des limites technologiques et des

ressources à la fin du XIX^e siècle et au début du XX^e siècle, certains puits ont été laissés ouverts alors que d'autres puits n'étaient pas fermés adéquatement (les compagnies pétrolières utilisaient les bouchons en bois pour obstruer les puits) (King et Valencia, 2014). Ces types de situations sont problématiques à plusieurs égards.

1.2.3.1 Enjeux environnementaux

Lorsque l'exploration et l'exploitation pétrolières ont commencé dans de nombreux pays du monde, il n'existait aucune réglementation établissant les responsabilités des compagnies pétrolières face aux problèmes qui pourraient survenir dans les puits après l'épuisement des ressources. À cette époque, les puits de pétrole et de gaz ont été abandonnés juste après l'épuisement des quantités d'hydrocarbures commercialisables. Avec le temps, des réglementations obligeant les compagnies pétrolières à boucher les puits après la fin de l'exploitation ont commencé à apparaître dans plusieurs pays. Pourtant, les responsables des puits avaient utilisé les méthodes de bouchage les moins coûteuses possible en respectant les exigences minimales mises en place par les états (Kelm et Faul, 1999).

Malgré cette amélioration des méthodes et des matériaux de bouchage, certains problèmes de perte d'étanchéité ont été évoqués pour plusieurs puits. En effet, la corrosion est considérée comme un problème majeur auquel l'industrie pétrolière fait face (Wafra, 1991). Ce phénomène peut se présenter dans plusieurs équipements du puits notamment le tubage en créant des orifices permettant aux fluides de s'infiltrer dans la formation ou vers la surface (Wafra, 1991). D'autre part, il peut y avoir une déconnexion entre le ciment et la formation, ou entre le ciment et le tubage, ce qui permet aux fluides de se déplacer vers la surface en suivant ce vide (Dusseault *et al.*, 2000). Enfin, les bouchons de ciment eux-mêmes peuvent se fissurer ou se déplacer vers le fond du puits (Davies *et al.*, 2014).

Aujourd'hui, de nombreux problèmes environnementaux sont associés aux puits de pétrole et de gaz inactifs. Les études menées aux États-Unis, au Canada et en France ont confirmé la contribution des fuites de méthane provenant des puits inactifs au réchauffement climatique (Riddick *et al.*, 2019; Wisen *et al.*, 2020). D'autres études ont confirmé la présence d'émissions fugitives de certaines substances (méthane, BTEX) provenant de puits qui n'ont pas été scellés ou qui ont été bouchés de manière inadéquate (Allen, 2014; Chevalier *et al.*, 2015; Jackson *et al.*, 2013; Kang *et al.*, 2016; Kang, Mary *et al.*, 2019; Kang, M. *et al.*, 2019; Meng, 2015; Pekney *et al.*, 2019; Riddick *et al.*, 2019; Tran *et al.*, 2020).

Des études hydrologiques ont révélé des risques importants et des effets néfastes sur l'environnement mesurés à moins de 1000 m des puits de pétrole et de gaz inactifs, notamment ceux qui utilisent la fracturation hydraulique (Avci, 1994; Boyle *et al.*, 2017; Casey *et al.*, 2016; Hill, 2018; Jackson *et al.*, 2013; McKenzie *et al.*, 2019; McKenzie *et al.*, 2014; McMahon *et al.*, 2018; Meng, 2015; Osborn *et al.*, 2011a). D'autre part, l'étude de McMahon et ses collaborateurs a montré que les eaux souterraines pouvaient être contaminées par le méthane provenant des puits forés anciennement, même s'ils avaient été complétés et obturés selon les réglementations de l'époque (McMahon *et al.*, 2018).

En 2011, Osborn et ses collaborateurs ont testé 68 échantillons d'eau potable prélevés dans trois régions de Pennsylvanie et de New York. Les échantillons ont été prélevés dans des puits d'eau à différentes distances des puits de gaz inactifs. Les résultats ont montré que la concentration de méthane dans les puits d'eau augmentait à mesure que l'on se rapprochait des puits de gaz et au-delà d'une distance de 1000 m, la concentration était moins significative. Selon la même étude, les niveaux de méthane dans les puits d'eau proches des puits de gaz pouvaient atteindre des niveaux explosifs (Osborn *et al.*, 2011a).

Les résultats d'Osborn ont été confirmés par une étude similaire réalisée par Jackson et ses collaborateurs deux ans plus tard. Dans leur étude, Jackson et son équipe ont analysé la qualité des eaux provenant de 141 puits d'eau potable dans la région nord-est de la Pennsylvanie. Les résultats ont révélé que le méthane a été détecté dans 82% des échantillons prélevés dans les maisons situées à moins d'un kilomètre des puits de gaz inactifs avec une concentration six fois plus grande que la norme recommandée aux États-Unis. La concentration d'éthane était 23 fois plus élevée et le propane a été détecté dans dix puits d'eau potable (Jackson *et al.*, 2013).

D'autre part, les puits de pétrole et de gaz inactifs peuvent également poser un danger pour les terres agricoles. Les agriculteurs qui ont un ou plus d'un puits dans leurs champs sont exposés à de nombreux risques, notamment la contamination du sol en cas de fuite provenant de ces puits. L'étude de Aba et Kavak a confirmé que les déversements de pétrole sur les terres agricoles constituent une couche huileuse qui empêche l'oxygène de se rendre aux racines des cultures et par la suite, les plantes jaunissent après quelques jours en raison de leur incapacité à respirer (Aba et Kavak, 2019). De plus, les agriculteurs utilisent souvent les eaux souterraines et superficielles pour l'irrigation des cultures, et une contamination de ces eaux est susceptible d'entraîner des pénuries de production ou même endommager complètement les cultures. Une étude en Chine a confirmé que les cultures irriguées par des eaux souterraines ayant subi une pollution due à l'extraction des gaz de schiste avaient été contaminées (Yang *et al.*, 2013). En revanche, d'autres études ont cherché à analyser la capacité des produits pétroliers à être transférés aux consommateurs à travers les produits agricoles, mais aucune étude n'a confirmé cette hypothèse (Aguilera *et al.*, 2010).

Le Tableau 1.1 présente une synthèse des effets potentiels des phases d'exploration, d'exploitation et de la phase post-exploitation sur les écosystèmes.

1.2.3.2 Enjeux sanitaires

En plus des effets environnementaux, les puits de pétrole et de gaz inactifs sont susceptibles d'avoir de graves impacts sur la santé humaine, tant au niveau physique, que psychologique ou socioéconomique sur les personnes affectées et leur entourage (D'Andrea et Reddy, 2014a).

Enjeux de santé et sécurité au travail

Les dangers sur la santé et la sécurité des travailleurs et travailleuses de la phase post-exploitation ne diffèrent pas de ceux de la phase d'exploitation. Cependant, les risques associés aux puits inactifs sont moins importants que ceux associés aux puits en service, étant donné que ces puits ont déjà épuisé leurs ressources. Dans la littérature actuelle, peu d'études s'intéressent à la santé et à la sécurité des travailleurs et travailleuses pendant la phase post-exploitation. Par conséquent, nous avons pu identifier certains risques pour la santé de ces personnes en comparant les activités qui peuvent avoir lieu dans un puits inactif avec celles qui se déroulent pendant la période d'utilisation du puits.

Comme nous l'avons déjà abordé dans la section précédente, dans un puits inactif, il peut y avoir des fuites de différents gaz. Une exposition des travailleurs et travailleuses près du site de la fuite peut engendrer des maux de tête, des vertiges ou des vomissements (Akinyede *et al.*, 2006). D'autre part, ces travailleurs et travailleuses sont susceptibles de développer des cancers, des irritations oculaires et respiratoires en cas d'exposition aux fuites de pétrole provenant d'un puits inactif, même si ceci est en faible quantité (Ordinioha et Brisibe, 2013). De même, ils sont confrontés à des risques cancérigènes, neurotoxiques, rénaux et hépatotoxiques en cas d'exposition aux métaux lourds (Ajayi *et al.*, 2009).

Enjeux de santé de la population

Dans un puits inactif, il est très probable d'avoir des fuites d'hydrocarbures pétroliers ou gaziers suite à une perte d'intégrité d'un ou plusieurs éléments du puits. Cependant, les conséquences pour la santé de la population peuvent se présenter sous deux formes : les accidents liés aux substances explosives ou l'exposition chronique à de faibles doses de contaminants.

Les produits gaziers susceptibles de s'échapper d'un puits inactif sont principalement du méthane, du propane et quelques autres gaz associés. Ces gaz sont inodores et incolores, ce qui les rend difficilement détectables. De plus, ces gaz sont extrêmement inflammables voire explosifs lorsque la fuite est importante. Même une légère fuite progressive de ces gaz dans ou à proximité d'un espace clos (par exemple un bâtiment) est susceptible de créer des volumes de gaz explosifs (CNESST, 2002, 2010).

Une exposition chronique de la population aux contaminants atmosphériques provenant des puits inactifs est susceptible d'engendrer des effets sanitaires majeurs tels que les atteintes au système nerveux, développement de tumeurs cancéreuses et la leucémie (Leclerc, 2014). De plus, les études à propos des contaminants environnementaux ont fait évoluer les notions en place depuis plusieurs années, selon lesquelles le fœtus est totalement protégé des agents environnementaux dans l'utérus (Chance et Harmsen, 1998). Des études ont révélé que la pollution de l'air était associée à plusieurs problèmes de développement chez les enfants (Tran *et al.*, 2020; Walker Whitworth *et al.*, 2018). Ces agents toxiques, parfois invisibles, peuvent avoir de lourdes incidences sur les enfants avant et après la naissance, même lorsqu'il s'agit d'une exposition à court terme (Bureau du vérificateur général du Canada, 2009). De plus, les enfants sont plus vulnérables aux effets de la pollution atmosphérique, car ils absorbent 20 à 50% plus d'air que les adultes, ainsi qu'ils ont un système immunitaire encore en développement (Kleinman, 2000). Enfin, les études ont confirmé que les

personnes immunodéprimées sont aussi vulnérables aux contaminants atmosphériques (Bonnet et Evrard, 2018).

Dans le cas des fuites de pétrole, les conséquences sur la santé dépendent principalement de l'étendue du déversement et de la fréquence d'exposition. Des études réalisées sur des personnes exposées aux hydrocarbures pétroliers suite à des déversements majeurs ont confirmé que les effets respiratoires, cutanés, hématologiques, hépatiques, endocriniens, neurologiques, rénaux et d'autres effets systémiques et somatiques sont les symptômes les plus courants auxquels font face ces personnes (Aguilera et al., 2010; D'Andrea et Reddy, 2013, 2014; Eykelbosh, 2014; Khurshid et al., 2008; Levy et Nassetta, 2011; Lyons et al., 1999) cités dans (Chevalier *et al.*, 2015)

Enfin, les eaux souterraines sont très vulnérables aux contaminations par les fluides de formation. L'étude de Osborn (2011) et Jackson (2013) a révélé des concentrations très élevées de certains gaz dans les échantillons d'eau prélevés des puits artésiens destinés à la consommation humaine (Jackson *et al.*, 2013; Osborn *et al.*, 2011a, 2011b). En plus des risques sur la santé déjà mentionnés dans les sections précédentes, la concentration de ces contaminants pourrait atteindre des niveaux explosifs, ce qui est très dangereux pour la sécurité des personnes (Jackson *et al.*, 2013).

Quant aux effets psychologiques, la présence des puits inactifs pour les communautés locales constitue une menace pour leur sécurité. Les études à ce sujet sont très peu nombreuses, mais nous essaierons d'identifier certains symptômes pouvant survenir chez ces personnes à travers les résultats d'études menées sur des sujets ayant vécu proche des sites pendant les travaux d'exploration ou d'exploitation. Pour ce faire, nous nous appuyons sur le document de Bouchard-Bastien et Gervais (2016).

Des études ont confirmé que certaines communautés avaient peur de la contamination des eaux souterraines pendant l'extraction des hydrocarbures. Dans les cas des puits inactifs, il peut y avoir des symptômes similaires au sein des communautés vivant proches de ces puits (Bouchard-Bastien et Gervais, 2016). D'autre part, des études ont attesté que les déversements accidentels des hydrocarbures sont associés à plusieurs perturbations psychologiques chez les communautés touchées. Ces communautés ont manifesté une forme de stress, d'anxiété et de dépression suite à ces accidents (Bouchard-Bastien et Gervais, 2016). Enfin, ces communautés perdent la confiance envers les autorités locales dès que les sites ont été implantés et ils sont susceptibles de maintenir cette perte de confiance même après la fermeture des puits. Ceci est dû principalement au manque de transparence des autorités et l'absence de consultations avec les citoyens locaux et ils croient que leurs décideurs ne peuvent pas les protéger ni gérer adéquatement le risque (Bouchard-Bastien et Gervais, 2016). C'est ce qui est survenu au Québec, où des regroupements de citoyens ont manifesté leur colère envers le MERN après que ce dernier n'a pas divulgué les rapports d'inspections des puits inactifs (Filteau, 2018).

1.2.3.3 Enjeux sociaux

Les impacts sociaux associés aux puits inactifs sont encore peu étudiés. Cependant, de nombreux effets associés aux phases d'exploration et d'exploitation sont susceptibles de persister dans ces communautés. Nous pouvons ainsi citer l'émergence des groupes de citoyens demandant aux autorités de protéger l'écosystème des nuisances pouvant survenir dans ces puits, comme c'est le cas au Québec avec le regroupement vigilant hydrocarbures Québec (RVHQ) et l'Association québécoise de lutte contre la pollution atmosphérique (AQLPA) et d'autres regroupements qui ne cessent de demander le MERN de procéder à des inspections des puits inactifs (Filteau, 2018). D'autre part, les personnes dont les activités économiques dépendent de l'environnement comme les agriculteurs, les pêcheurs et les chasseurs peuvent être affectées en cas de déversement

d'hydrocarbures provenant d'un puits inactif (Bouchard-Bastien et Gervais, 2016). Enfin, la présence des puits inactifs est susceptible d'engendrer un manque de confiance entre les citoyens et citoyennes et les autorités locales, d'autant plus quand ces derniers ne sont pas en mesure de gérer un tel dossier, ce qui entraîne des conséquences négatives sur le tissu social (Bouchard-Bastien et Gervais, 2016).

Tableau 1.1 Synthèse des effets sur les écosystèmes pouvant survenir au cours des opérations pétrolières

Phase	Activités possibles	Environnement affecté	Description des effets
Activités sismiques	Aménagement des routes Circulation des engins Explosions Vibrations	Humain Atmosphère Biophysique	Déforestation pour l'aménagement des routes Émissions des GES provenant des engins Perturbation des écosystèmes à cause des ondes acoustiques Utilisation des explosifs Bruit causé par les engins Risque d'incendie Conflits d'occupation du sol (en particulier avec les terres autochtones)
Forage	Aménagement des routes Installation des équipements Exécution des travaux de forage Déménagement	Humain Atmosphère Terrestre Biophysique	Déforestation pour l'aménagement des routes Bruits et émissions des GES causés par les engins transportant le matériel Bruit et émissions des GES provenant des équipements de forage pendant l'exécution des travaux Utilisation des produits chimiques toxiques pour la boue de forage Risque de déversement de produits toxiques pendant l'entreposage Risque de fuites au niveau du borbier (le bassin utilisé pour le stockage des surplus de boue) Émissions des GES provenant de la torche Pollution lumineuse et perturbation des écosystèmes (les chantiers de forage travaillent 24h/24)

*Les informations sur les phases activités sismiques, forage et exploitation sont adaptées de (UNEP, 1997)

Tableau 1.1 Synthèse des effets sur les écosystèmes pouvant survenir au cours des opérations pétrolières (suite)

Phase	Activités possibles	Environnement affecté	Description des effets
Forage (suite)			<p>Déversement des eaux usées du camp dans la surface (en l'absence d'un réseau de collecte d'égouts)</p> <p>Conflit d'occupation des sols (un chantier de forage occupe entre 4000 et 15000 m², en ajoutant le camp qui peut occuper jusqu'à 1000 m²)</p> <p>Atteint aux droits des autochtones</p> <p>Risques sur la santé physique et psychologique des communautés locales</p> <p>Réhabilitation du terrain après la fin du forage (les compagnies souvent effectuent remise à l'état selon les exigences minimales)</p>
Exploitation (Développement)	<p>Préparation du site</p> <p>Installation des séparateurs</p>	<p>Humain</p> <p>Atmosphère</p> <p>Terrestre</p> <p>Biophysique</p>	<p>Déforestation pour aménagement des routes</p> <p>Déversement suite à une détérioration des vannes de la tête de puits</p> <p>Déversement suite à une fuite au niveau du tubage</p> <p>Émissions des gaz pour les puits aménagés d'un séparateur sur place</p> <p>Émissions des eaux polluées provenant de la séparation des huiles</p>

* Les informations sur les phases activités sismiques, forage et exploitation sont adaptées de (UNEP, 1997)

Tableau 1.1 Synthèse des effets sur les écosystèmes pouvant survenir au cours des opérations pétrolières (suite)

Phase	Activités possibles	Environnement affecté	Description des effets
Poste exploitation	Travaux de bouchage Installation d'une clôture Coupe de tubage sous la terre	Humain Biophysique Atmosphère Terrestre	Risque de fuites de pétrole en cas de perte d'intégrité d'un ou plusieurs éléments du puits (tubage, tête de puits, ...etc) (Tveit <i>et al.</i> , 2019) Risque de contamination des eaux souterraines et/ou de surface (Jackson <i>et al.</i> , 2013; Osborn <i>et al.</i> , 2011b) Risque de fuites de gaz en cas de perte d'intégrité (Tran <i>et al.</i> , 2020) Risque de contamination du sol (Aba et Kavak, 2019) Contribution au réchauffement climatique (en cas de fuites de méthane) (Riddick <i>et al.</i> , 2019; Wisen <i>et al.</i> , 2020) Risque d'explosions en cas de fuites de méthane (CNESST, 2010)

* Les informations sur les phases activités sismiques, forage et exploitation sont adaptées de (UNEP, 1997)

1.3 Aspects législatifs et réglementaires entourant l'exploration et à l'exploitation des hydrocarbures pétroliers et gaziers au niveau provincial

Dans la présente section, nous présentons les lois et règlements encadrant les activités pétrolières et gazières au Québec. Nous développons d'abord l'historique de l'évolution de la Loi sur les mines qui était le seul outil législatif permettant d'encadrer ces activités. Ensuite, nous présentons la Loi sur les hydrocarbures entrée en vigueur en septembre 2018.

Depuis 1867, la Loi constitutionnelle du Canada a partagé les pouvoirs législatifs entre le gouvernement fédéral et les gouvernements provinciaux. En d'autres termes, le gouvernement fédéral est autorisé à gérer les affaires de dimension nationale, tandis que les gouvernements provinciaux ont juridiction sur toutes les questions relatives à leurs territoires (Tremblay et Kolli, 2016). À cet égard, la législation fédérale, en ce qui a trait aux ressources naturelles, ne s'applique que sur les terres domaniales, notamment le golfe du Saint-Laurent (Tremblay et Kolli, 2016). D'ailleurs, l'article 109 de la constitution attribue aux provinces tous les pouvoirs sur les ressources souterraines qui se trouvent sur leur territoire, faisant d'elles la seule autorité à promulguer des lois régleront les opérations dans ce secteur (Tremblay et Kolli, 2016).

Étant donné que le golfe du Saint-Laurent fait partie des terres fédérales, toutes les opérations (navigation, recherche des hydrocarbures, transport, etc.) qui peuvent s'y dérouler sont soumises aux lois fédérales. En 1964, des revendications provinciales ont eu lieu demandant le plein pouvoir sur les ressources naturelles du golfe Saint-Laurent. Après des années de négociations avec Ottawa, deux provinces soit la Nouvelle-Écosse et Terre-Neuve-et-Labrador, ont accepté la proposition du gouvernement fédéral visant à établir une gestion conjointe consistant d'une part à élaborer des lois qui réglementent les différentes opérations pétrolières pouvant avoir lieu dans le golfe, et d'autre part à partager les revenus (Tremblay et Kolli, 2016). Quant au Québec, le fleuve Saint-

Laurent est considéré comme propriété du gouvernement provincial en vertu de la Loi sur les terres du domaine de l'état, qui « s'applique à toutes les terres qui font partie du domaine de l'État, y compris le lit des cours d'eau et des lacs, de même que les parties du lit du fleuve Saint-Laurent et du golfe du Saint-Laurent appartenant au Québec par droit de souveraineté » (Tremblay et Kolli, 2016). En somme, les opérations relatives aux secteurs des hydrocarbures dans toutes les régions du Québec, y compris dans le Saint-Laurent, sont donc soumises à la Loi sur les hydrocarbures du gouvernement provincial.

Au niveau provincial, la législation en matière d'exploration et d'exploitation des ressources naturelles remonte au 19^e siècle. Bien que l'exploration des ressources naturelles ait commencé au Québec depuis 1686, alors que le premier gisement de plomb, de zinc et d'argent a été découvert en Abitibi-Témiscamingue. (MERN, 2019a), les richesses souterraines n'étaient pas considérées comme propriétés étatiques à cette époque. C'est seulement en 1880 que le gouvernement a adopté la première loi sur les mines, intitulée l'Acte général des mines de Québec, qui a attribué au gouvernement la propriété du sous-sol (MERN, 2019a). Cette loi est devenue le seul outil législatif habilité à réglementer les travaux d'exploration et auquel sont soumis les prospecteurs. À cette époque, les activités d'exploration et d'exploitation pétrolières et gazières ont été aussi soumises à l'Acte général des mines de Québec (Gouvernement du Québec, 2019).

La loi sur les mines a été modifiée plusieurs fois. Avant 1987, aucun texte législatif dans la loi sur les mines de Québec n'obligeait les compagnies minières, pétrolières ou toute autre compagnie exerçant dans le secteur industriel, à entreprendre des travaux de restauration de leur site après la cessation des activités d'exploitation (MinesQC.com, s.d). En 1987, une nouvelle condition a été ajoutée dans la loi sur les mines qui obligeait le détenteur du permis d'exploration à demander l'autorisation d'abandon auprès du MERN qui consultait à son tour le ministre de l'Environnement

avant de prendre la décision (MinesQC.com, s.d). En 1991, des textes juridiques ont été ajoutés à la loi sur les mines qui obligeaient les prospecteurs à prévoir un plan de réaménagement et de restauration du site et à déposer des garanties financières convenables pour la couverture de 70% des coûts nécessaires à la réhabilitation après la fin de vie du site (art 232.1 à 232.10 de la loi sur les mines). Cette modification n'a été mise en application qu'en 1995 (MinesQC.com, s.d). Quant au secteur pétrolier, la loi sur les mines contenait le règlement sur le pétrole, le gaz naturel et les réservoirs souterrains qui dictent les règles mises en place spécialement pour les activités pétrolières et gazières à cette époque. Ce règlement est composé de plusieurs sections, notamment, la partie dédiée aux modalités de fermeture temporaire et définitive des puits de pétrole et de gaz ainsi que les responsabilités des promoteurs (art 58 à 61).

Selon la dernière version du règlement sur le pétrole, le gaz naturel et les réservoirs souterrains de la loi sur les mines, les entreprises détentrices de permis d'exploration désirant fermer définitivement un puits doivent respecter les lignes directrices suivantes (MDDELCC, 2014) :

- 1- Le puits doit être colmaté conformément aux exigences de l'article 61 Section IV du règlement sur le pétrole, le gaz naturel et les réservoirs souterrains de la loi sur les mines.
- 2- Dans les 90 jours suivant la fermeture, un test de migration de gaz doit être effectué selon la *Procédure pour l'évaluation de la migration des gaz dans les sols et l'eau souterraine à proximité d'un puits d'exploration gazière ou pétrolière* élaborée par le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements climatiques (MDDELCC).
- 3- Le responsable du puits doit s'assurer qu'il n'y a pas de migration de gaz susceptible d'affecter l'environnement.
- 4- Le responsable du puits doit, au plus tard 30 jours après la fermeture du puits, vider et démonter les infrastructures de stockage.
- 5- Le responsable du puits doit procéder à une caractérisation environnementale du site conformément au Guide de caractérisation des terrains du MDDELCC.

- 6- Dans le cas où une restauration du terrain est recommandée, l'entreprise doit présenter un plan de réhabilitation au MDDELCC avant de procéder aux travaux.

Ce n'est qu'en 2016 que la première Loi sur les hydrocarbures a vu le jour au Québec. Cette loi a été formulée spécialement pour réglementer les opérations pétrolières ainsi que les autres activités énergétiques dans le territoire de la province, surtout après les limites signalées dans la Loi sur les mines. Elle avait pour objet de définir les responsabilités des entreprises qui envisagent d'investir dans les énergies non renouvelables dans la région du Québec, notamment en ce qui concerne les travaux d'exploration, de production et de stockage des hydrocarbures pétroliers et gaziers (MERN, 2018a). L'adoption de cette loi a été très contestée, non seulement par les membres de l'Assemblée nationale, mais aussi par une partie importante de la population (Filteau, 2017; Radio-Canada, 2016; Simon, 2016).

En ce qui a trait aux modalités de fermeture des puits de pétrole et de gaz, la loi a apporté de nouveaux règlements. La nouvelle loi exige un plan de fermeture définitive qui doit être déposé au ministère le jour où le titulaire du permis d'exploration demande l'autorisation de forage, avec un dépôt de garantie d'une valeur à la mesure des coûts attendus de la réalisation des travaux de fermeture prévus. Cependant, contrairement à la loi précédente, le promoteur est celui qui détermine le mode et le mécanisme de fermeture, en se référant soit au règlement sur les activités d'exploration, de production et de stockage d'hydrocarbures en milieu terrestre, si le puits est foré en onshore, sinon au règlement sur les activités d'exploration, de production et de stockage d'hydrocarbures en milieu hydrique, si le puits est foré en offshore; qui décrivent les modalités de fermeture temporaire et définitive des puits (chapitres XIV des deux règlements H-4.2, r. 1 et H-4.2, r. 2).

En revanche, l'article 105 de la récente Loi sur les hydrocarbures confirme que le ministre de l'Énergie et des Ressources naturelles ne peut approuver un plan de

fermeture définitive qu'avec l'avis favorable du ministre du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) (MELCC actuellement).

De son côté, le MELCC a mis en place plusieurs règlements dans la Loi sur la qualité de l'environnement (LQE), qui visent la protection de l'environnement contre toutes sortes de contaminants. Dans ce cas, le promoteur doit se référer à LQE et aux lignes directrices sur l'exploration gazière et pétrolière mises en place par le MELCC, notamment la section 2.5, lors de la présentation de son plan de fermeture. Toutefois, le guide présenté par le MELCC est basé sur le règlement sur le pétrole, le gaz naturel et les réservoirs souterrains de la loi sur les mines qui a été abrogée le 20 septembre 2018.

En 2018, le MERN a lancé un projet d'inspection des puits inactifs forés sur le territoire de la province (MERN, 2019d). Sur la base des documents collectés auprès des compagnies pétrolières, les inspecteurs du ministère cherchent à localiser les puits comme première étape en utilisant les coordonnées géographiques pour chaque puits. Ensuite, ils procèdent à une caractérisation de terrain pour vérifier la présence des contaminants autour du puits. Parallèlement, une autre équipe est chargée d'identifier le responsable du puits. Dans le cas où la compagnie responsable du puits est dissoute, la responsabilité incombe sur le ministère. À cet effet, le gouvernement a accordé un montant de 4,5 millions de dollars pour deux ans (2019 à 2021) pour soutenir les travaux pouvant avoir lieu dans le cadre de ce projet (MERN, 2019d).

1.4 La situation des puits de pétrole et de gaz inactifs au Québec

Dans cette section, nous présentons un survol des données disponibles concernant les puits de pétrole et de gaz qui ont été forés au Québec depuis 1860. Ensuite, nous évoquons différentes mobilisations citoyennes et la couverture médiatique en lien avec la question des puits inactifs qui ont eu lieu au Québec durant les dernières années. En

fin, nous concluons par une description de la situation de la Montérégie face à la présence des puits inactifs.

1.4.1 Données disponibles

Depuis la fin du XIX^e siècle, plusieurs compagnies pétrolières ont foré des puits au Québec dans le but d'exploiter des ressources énergétiques principalement du gaz et du pétrole un peu partout dans le territoire du Québec (MERN, 2019d). Une grande partie de ces puits n'a pas de responsable connu, étant donné que la majorité des compagnies pétrolières qui avaient des permis d'exploitation au Québec n'existent plus à l'heure actuelle (MERN, 2019d).

Depuis l'annonce de son projet d'inspection des puits en 2014, le MERN a répertorié 920 puits, dont 130 actifs et 790 inactifs (MERN, 2019d), cependant, le nombre de puits localisés avec certitude n'est toujours pas disponible. Par conséquent, le ministère a instauré une carte indiquant la position des puits forés au Québec, ainsi que d'autres informations pertinentes sur ces puits. À l'aide de cette carte en accès libre, il est possible pour tous les québécois et québécoises de vérifier si un puits (peu importe son statut) est foré sur leur territoire (MERN, 2016).

1.4.2 Mobilisations citoyennes entourant la question des puits inactifs

Au cours des dernières années, nous avons assisté à une mobilisation citoyenne autour de l'enjeu des puits de pétrole et de gaz inactifs au Québec. Le Regroupement vigilance hydrocarbures Québec (RVHQ) et l'Association québécoise de lutte contre la pollution atmosphérique (AQLPA) sont les acteurs principaux de cette mobilisation. Le RVHQ est un mouvement citoyen créé pendant l'opposition contre les projets d'exploitation des gaz de schiste qu'a vécu le Québec en 2011. La lutte contre toutes sortes d'activités en lien avec le développement de la filière des hydrocarbures est sa principale mission. De plus, le RVHQ est souvent impliqué dans les campagnes de consultations menées

par le gouvernement sur des questions touchant le secteur de l'énergie. D'autre part, l'AQLPA est une association indépendante regroupant des personnes physiques et morales et a pour objectif d'améliorer la qualité de l'air au Québec. En 2014, l'AQLPA avait mis son expertise au service du MERN pour effectuer des inspections des puits inactifs (MERN, 2014). Cependant, en 2018 un groupe d'organismes dont faisaient partie le RVHQ et l'AQLPA, a demandé au MERN de rendre publics les rapports d'inspections réalisées par AQLPA en 2015, car ce dernier ne voulait pas les diffuser (Filteau, 2018).

Dans le même contexte, plusieurs regroupements et associations de protection de l'environnement, à savoir Greenpeace, Eau secours, Nature Québec et d'autres groupes citoyens, ont été mobilisés pour faire pression sur le gouvernement de Québec et son MERN afin de procéder à une inspection rigoureuse de l'ensemble des puits inactifs qui se trouvent au Québec. Toutefois, leurs demandes n'ont pas été prises en compte par le ministère. Le 27 février 2018, un groupe de citoyens et de citoyennes a envoyé une lettre ouverte au ministre de l'Énergie et des Ressources naturelles de cette époque en lui demandant d'adopter des méthodes d'inspection plus développées et que son ministère soit plus transparent notamment en ce qui concerne les résultats d'inspections (Salvace, 2018). L'intérêt citoyen pour cette question était motivé par la présence de plusieurs puits inactifs à proximité de zones habitables, de champs agricoles et de cours d'eau.

En 2013, un groupe d'écologistes a signalé la présence d'un ancien puits à 15 m des habitations dans la ville de Gaspé. Le groupe a recommandé de mettre en place une clôture autour du puits pour isoler ce dernier. En 2017, soit quatre ans après, les personnes habitant près de ce puits inactif ont remarqué la présence d'une marée huileuse autour du lieu présumé de ce puits, avec des bulles de gaz qui s'en échappaient. Les gens étaient préoccupés par la situation, notamment avec le silence des autorités responsables. Une étude épidémiologique des effets des fuites sur la santé humaine a

été la première demande des citoyens et citoyennes de cette région lors d'une rencontre avec les médias (Toulgoat, 2017).

Dans la presse locale, la question des puits inactifs a fait couler beaucoup d'encre depuis des années, avec de nombreux articles qui datent de 2016 à 2018 publiés dans les médias tels que *Le Devoir*, *Radio-Canada*, *Le Soleil*, etc. Pendant ces deux années, il y a eu un va-et-vient entre les regroupements citoyens défendant l'environnement et le gouvernement après l'annonce du projet de Loi sur les hydrocarbures en 2016 et son adoption en 2018. Grâce à des entrevues avec plusieurs représentants du gouvernement à l'image du premier ministre et ses deux ministres, celui de l'énergie et celui de l'environnement, les médias ont réussi à faire entendre la voix des opposants aux plus hauts responsables du gouvernement. Au début 2020, on a assisté à un retour médiatique sur la question des puits inactifs notamment après l'éruption du puits de gaz naturel situé dans la municipalité de Batiscan soulevant l'inquiétude de la population locale (Radio-Canada, 2020a). En septembre 2020, le journal *Le Devoir* a publié un nouvel article qui confirme la présence d'au moins 244 puits de pétrole et de gaz inactifs dans les basses terres du Saint-Laurent qui ne sont pas encore localisés et inspectés par le MERN (Shields, Alexandre, 2020).

1.4.3 Le cas de la Montérégie

Une analyse superficielle de la carte des puits inactifs fournie par le MERN a montré la présence des puits sur l'ensemble du territoire de la province (MERN, 2016). Néanmoins, les régions de la Montérégie, du Centre-du-Québec, de la Mauricie, du Bas-Saint-Laurent et Gaspésie-Iles-de-le-Madeleine ont connu un développement pétrolier important en comparaison des autres régions. Ces régions se trouvent principalement dans le sud du Québec.

Par ailleurs, la situation de la Montérégie est particulière en raison du nombre élevé des puits qui y ont été forés à la fin du XIX^e siècle et au début du XX^e siècle. La carte des

hydrocarbures montre que la majorité des puits inactifs en Montérégie se trouvent dans des terres agricoles, d'autant plus qu'il est connu que la région est justement riche en terres agricoles. D'autre part, de nombreux puits inactifs sont situés le long du fleuve Saint-Laurent. Bien que la situation soit préoccupante en Montérégie, nous n'entendons que rarement le ministère parler de cette région. En effet, le gouvernement a annoncé à plusieurs reprises (de façon indirecte) que les puits inactifs se trouvent principalement dans les régions des basses terres du Saint-Laurent, du Bas-Saint-Laurent et de la Gaspésie, et ce malgré le nombre important de puits dans la région de la Montérégie que l'on peut voir clairement à travers la carte des hydrocarbures.

A ce jour, aucune étude n'a été effectuée sur les puits de pétrole et de gaz inactifs en Montérégie à l'exception de certains rapports d'inspection effectués par le MERN, mais qui sont majoritairement incomplets et ne contiennent que certaines informations de base sur ces puits.

1.5 Question de recherche

Les éléments de la problématique présentés précédemment ont montré que les opérations d'exploration et d'exploitation d'hydrocarbures sont associées à un vaste éventail d'enjeux environnementaux, sanitaires et sociaux, et que certains de ces enjeux peuvent survenir même après la fermeture des puits de pétrole et de gaz.

Actuellement la recherche scientifique s'intéresse beaucoup aux effets environnementaux et socio-économiques associés à l'industrie pétrolière pendant les phases d'exploration et d'exploitation (Nriagu *et al.*, 2016). Des recherches s'intéressent aux effets sur la santé des travailleurs et travailleuses et des bénévoles d'une exposition aux produits pétroliers notamment ceux qui contribuent aux travaux de décontamination des sites après les déversements d'hydrocarbures majeurs comme Deepwater Horizon et Erika (Cheong *et al.*, 2011) cité par (Nriagu *et al.*, 2016). Au

Québec, l'INSPQ a été mandaté plusieurs fois par le gouvernement pour documenter les effets potentiels sur la santé publique liés à l'exploration et l'exploitation des hydrocarbures conventionnels et non conventionnels (gaz de schiste) (Brisson *et al.*, 2014; Chevalier *et al.*, 2015). En 2010, l'institut avait réalisé à la demande du ministère de la Santé et des services sociaux (MSSS), une analyse documentaire afin de recenser la relation entre l'exploitation des gaz de schiste et la santé publique (Brisson *et al.*, 2010). En 2013, une équipe de l'INSPQ avait mis à jour ce rapport en ce penchant sur les risques technologiques, les risques reliés à la pollution de l'air, à la contamination de l'eau et les effets sur la qualité de vie (Brisson *et al.*, 2014). En 2014, le mandat confié à l'INSPQ consistait à documenter les enjeux et les effets potentiels sur la santé publique liés à l'exploration et l'exploitation des hydrocarbures. Ce mandat a été réalisé par une équipe scientifique multidisciplinaire dans le cadre des travaux d'évaluation environnementale stratégique de 2014 après l'annonce du plan gouvernementale sur les hydrocarbures (Chevalier *et al.*, 2015).

Cependant, dans l'ensemble des études qui tentent d'identifier les impacts des éventuels projets d'extraction des hydrocarbures pétroliers ou gaziers et d'autres qui analysent les effets des projets déjà en cours, les conséquences sur la qualité de l'environnement et sur la santé humaine de la phase post-exploitation ont reçu peu d'attention. La question est donc : dans quelle mesure les puits de pétrole et de gaz inactifs représentent-ils des risques pour l'environnement et la santé ?

1.6 Objectifs de la recherche

Comme en témoigne la revue de la littérature, l'exploration et l'exploitation des hydrocarbures présentent des risques pour l'environnement et pour la santé humaine, et ce, même pendant la phase de post-exploitation. Bien que les lois et règlements en vigueur au Québec aujourd'hui obligent les promoteurs à fermer leurs puits de façon adéquate, des puits inactifs sont toujours orphelins. Ces puits inactifs sont sous la

responsabilité du MERN, qui doit les localiser et s'assurer que leur fermeture soit conforme, de manière à minimiser les risques pour l'environnement et la santé. Certains d'entre eux demeurent toujours non localisés et des interventions de fermeture adéquate doivent être prioritaires de façon à cibler les puits posant les plus grands risques pour l'environnement et la santé.

La présente étude a donc trois objectifs principaux :

1. Réaliser une analyse spatio-temporelle de l'évolution des forages pétroliers et gaziers dans la région de la Montérégie;
2. Cartographier la vulnérabilité des milieux naturels, bâtis et humains de la Montérégie face à la présence des puits inactifs;
3. Proposer une classification des puits inactifs selon leurs profils.

CHAPITRE II

CADRE THÉORIQUE

Dans ce chapitre, nous présentons les bases théoriques sur lesquelles s'appuie le présent mémoire. Premièrement, nous exposons les approches écosystémiques de la santé ainsi que les six principes qui y sont associés. Ensuite, nous présentons le concept de vulnérabilité adapté à notre analyse et les trois composantes qui le définissent.

2.1 Les approches écosystémiques de la santé

Le terme approche écosystémique de la santé ou "écosanté" a été utilisé pour la première fois en 1978 par des chercheurs et chercheuses dans un rapport du Comité consultatif de recherche sur les Grands Lacs à la Commission mixte internationale (Webb *et al.*, 2010). Depuis, le terme a été très utilisé dans la recherche en santé publique, notamment au Canada. En effet, depuis plusieurs décennies, la recherche en santé publique au Canada a tenté de comprendre les interactions complexes entre la santé humaine et les facteurs environnementaux et sociaux. S'appuyant sur la notion de pensée écologique et systémique, les équipes de recherche canadiennes ont été les premières à inclure les sciences sociales et les sciences de la santé dans la gestion des écosystèmes. À travers de nombreux projets menés au Canada et à l'étranger, les approches écosystémiques ont été développées grâce aux efforts de chercheurs du monde entier (Webb *et al.*, 2010). Bien que l'écosanté ait été utilisée dans plusieurs projets de recherche à travers le monde, le Centre de recherches pour le développement

international (CRDI) a joué un rôle très important dans le développement de l'utilisation des approches écosystémiques en soutenant financièrement un grand nombre de ses projets (Charron, 2012; Webb *et al.*, 2010).

Le développement industriel que l'humanité a vécu au cours du XIX^e siècle a conduit à une surexploitation des ressources naturelles entraînant un déséquilibre dans l'écosystème. Cette évolution a souvent été accompagnée d'une dégradation de l'environnement et de l'émergence de maladies et d'épidémies qui ont fait de nombreuses victimes principalement dans des pays en développement (Charron, 2012). D'autre part, le développement industriel a créé des écarts importants entre les riches et les pauvres, ce qui a poussé ces populations pauvres à utiliser les écosystèmes d'une manière non durable et à mettre leur santé en danger (Charron, 2012). Les approches écosystémiques de la santé sont donc apparues pour proposer des cadres de gestion durables tout en mettant l'accent sur l'amélioration de la santé humaine et la protection de l'environnement (Lebel, 2003). Il s'agit d'approches qui servent entre autres à promouvoir la santé et le bien-être des humains, des animaux et des écosystèmes.

En effet, l'application des approches écosystémiques de la santé dans les travaux de recherche est souvent complexe et dépend du contexte. En 2012, Charron a défini six principes qui peuvent éclairer le processus d'application des approches écosystémiques de la santé : la pensée systémique, la transdisciplinarité, la participation, la durabilité, l'équité entre les sexes et l'équité sociale et le passage du savoir à l'action (Charron, 2012).

Le présent projet s'ancre dans ces principes à des degrés variables, que nous préciserons dans ce qui suit.

2.1.1 La pensée systémique

Dans le cadre d'une recherche en écosanté, il est nécessaire de mettre en place un cadre méthodologique qui explique les limites, les dimensions et la dynamique du problème. Cette démarche est essentielle afin d'élaborer un processus de recherche riche et complet et une façon de réfléchir sur une problématique (Kovacic, 2017). En effet, la complexité propose une définition de la science qui est différente du modèle classique lequel repose sur la prédiction, le contrôle et l'hypothèse. Elle estime que les systèmes peuvent être mieux décrits et compris en observant les processus qui dirigent leur comportement. Cette théorie critique l'observation comme une action qui ne nécessite aucune illustration de la part de l'analyste (Kovacic, 2017). Elle inclut les notions d'émergence, de non-linéarité, d'imprédictibilité, d'autopoïèse et de systèmes adaptatifs pour indiquer l'existence de diverses mesures analytiques afin de décrire le comportement du système (Funtowicz et Ravetz, 1994).

L'approche de la pensée systémique prend en compte la notion du système et place la définition du système au cœur de son processus. Cette approche confirme que plus le problème devient complexe, plus le choix des outils utilisés pour décrire le problème est important (Kovacic, 2017).

Dans le présent projet, les puits inactifs peuvent influencer l'environnement et la santé humaine selon différents processus et à différentes échelles. En effet, il est difficile de déterminer les risques que les puits inactifs peuvent entraîner. L'estimation des impacts dépend de plusieurs facteurs à savoir l'emplacement du puits, l'année de forage, la méthode de complétion et l'état actuel du puits. Afin d'illustrer cette complexité, nous donnons un exemple simple. Une fuite dans un aquifère est capable de contaminer les eaux souterraines et les conséquences pour la santé humaine sont remarquées à long terme. Cependant, si cette fuite se produit à l'extérieur du puits, elle est susceptible de contaminer le sol, et ses conséquences seront rapportées à court terme. De plus, les risques sont aussi liés au contexte géographique. Un puits qui se trouve dans une zone

éloignée présente moins de risque par rapport à un autre qui se trouve dans une zone peuplée.

2.1.2 La transdisciplinarité

La recherche transdisciplinaire en écosanté fait appel à l'intégration des différentes perspectives académiques et des savoirs non universitaires dans la recherche de solutions à un problème qui touche la santé des communautés. Le but de cette approche est de rassembler les différents points de vue locaux afin de comprendre le problème plus profondément et de tous côtés (Charron, 2012).

L'application d'une approche transdisciplinaire à la recherche écosanté nécessite un long travail, qui prend parfois des années avant d'entreprendre le projet en tant que tel. Le facteur clé pour réussir une recherche transdisciplinaire est de construire une relation fiable avec les intervenants, qui repose sur la confiance avant tout. Le fait de gagner la confiance des participants aidera mieux aux prochaines démarches de la recherche, notamment pour assurer une participation constructive (Charron, 2012).

Enfin, la transdisciplinarité doit être adoptée comme un des principaux piliers dans les projets de recherche afin d'éliminer les barrières pouvant nuire à la qualité des résultats. Pour cela, il est nécessaire d'introduire le concept et de commencer à le mettre en pratique pendant les études préuniversitaires des étudiantes et étudiants (Gillis *et al.*, 2017).

Dans le présent projet, la transdisciplinarité était au cœur de notre processus de recherche. En effet, la question des puits inactifs fait appel à l'intégration des savoirs de plusieurs disciplines telles que l'hydrogéologie, les sciences de l'environnement et les sciences sociales. Nous avons aussi pris en compte les questions découlant des différentes mobilisations citoyennes entourant les puits inactifs qui ont eu lieu dans les dernières années, plus spécifiquement au Québec. D'autre part, dans le présent projet,

nous avons analysé le cadre de gestion des puits inactifs au Québec afin de tirer des observations pouvant nous aider à comprendre la problématique plus en profondeur.

2.1.3 La participation

En écosanté, la participation et la transdisciplinarité vont de pair, de sorte que les intervenant.es (professionnel.les et non-professionnel.les) sont appelés à participer à la recherche et à agir comme un atout aux connaissances déjà créées par la recherche et qui rend plus efficace l'exécution des travaux (Charron, 2012). La participation se veut une implication et une intégration des connaissances des acteurs, chacun selon son point de vue. Le but ultime derrière cette composante méthodologique de la recherche en écosanté est de faire apparaître toutes les perspectives possibles des acteurs en jeu.

La participation des collectivités est un moyen incontournable pour l'innovation et la compréhension des perspectives locales. Une meilleure représentation des acteurs aide à la production et l'utilisation de nouvelles connaissances. Cependant, l'essentiel est d'assurer une participation et une intégration des savoirs de tous les intervenants (académiques et non-académiques).

De nombreux chercheurs ont confirmé que les résultats des études participatives sont fortement influencés par le processus selon lequel les populations locales sont intégrées et par qui, parmi ces personnes, est impliqué (Cornwall, 2003; Cornwall et Jewkes, 1995). Cependant, le processus de recrutement doit se faire d'une manière adéquate afin d'éviter les conflits entre les intervenants. Des études ont confirmé qu'il est nécessaire de refléter la diversité socioculturelle de la communauté afin d'atteindre une participation effective des femmes, des hommes et de l'ensemble des groupes sociaux affectés par le problème (Cornwall, 2003; Mayoux, 1995; Rogers, 1976).

Dans le cadre de ce projet, nous n'avons pas été en mesure de nous lancer dans une recherche participative. Ce principe ne fait donc pas partie de notre processus de

recherche, mais il sera abordé dans la discussion des pistes possibles à suivre dans les recommandations.

2.1.4 La durabilité

Le principal objectif de la recherche en écosanté est d'améliorer la santé et le bien-être des personnes tout en préservant l'écosystème pour les générations actuelles et futures (Charron, 2012; Forget et Lebel, 2001; Lebel, 2003). À partir de cette définition, la durabilité doit être prise en considération dans les recherches en écosanté qui tentent de trouver une solution à un problème donné.

En effet, la durabilité est devenue un concept largement utilisé ces dernières années, notamment dans le développement des projets. La Commission mondiale sur l'environnement et le développement a défini le terme comme étant un développement qui répond aux besoins des générations actuels sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs besoins (Brundtland *et al.*, 1987). Cela reflète une question d'équité intergénérationnelle, de sorte que nous devons préserver l'environnement afin d'assurer les ressources à nos enfants (Kuhlman et Farrington, 2010). La durabilité peut donc être définie comme étant un bien-être qui doit être maintenu pour une longue période, voire de façon indéfinie (Kuhlman et Farrington, 2010).

La recherche en écosanté a pour objectif de trouver des solutions à un problème donné. En s'appuyant sur le principe de la durabilité, les changements qui devraient être proposés par une recherche en écosanté doivent être socialement et écologiquement viables. Cependant, nous ne pouvons pas garantir des résultats positifs à tous les projets ayant suivi une telle démarche, car ces derniers peuvent présenter des limites, de sorte que les solutions obtenues ne répondent pas aux attentes des populations locales, et peuvent parfois même aggraver la situation (Charron, 2012). Enfin, il est aussi nécessaire de prendre en considération la dimension de l'équité lors de la recherche des

solutions et de mettre en évidence les préoccupations des générations actuelles, sans compromettre l'ordre de priorité.

Le présent projet a comme objectif d'étudier la question des puits inactifs et ses impacts potentiels sur l'environnement et la santé humaine. Nous tentons de proposer une approche de gestion des puits inactifs applicable à grande échelle. Cette approche répond aux questions émanant des mobilisations citoyennes qui ont eu lieu au Québec demandant un encadrement efficace des puits inactifs forés dans l'ensemble du territoire de la province. Enfin, la classification des puits inactifs selon leur degré de risque sert à identifier ceux qui doivent être réparés en priorité. Cette méthode a le potentiel d'accélérer les interventions dans les puits, et évitera de nombreux problèmes environnementaux et sanitaires ce qui assurera un écosystème sain pour les générations futures.

2.1.5 L'équité sociale et de genre

Selon les approches écosystémiques de la santé, l'équité sociale et de genre consiste à exclure les dominations entre les sexes et les inégalités sociales entre les différents groupes impliqués dans une problématique de santé environnementale. Dans une communauté, il existe plusieurs facteurs pouvant créer des écarts sociaux entre les personnes tels que l'âge, la situation économique, le sexe et le genre, le niveau d'éducation et bien plus que ça (Charron, 2012). Bien que plusieurs groupes aient consacré leurs efforts afin d'intégrer l'équité sociale et de genre dans toutes les phases de la recherche en santé, cette intégration pose toujours des défis (Clayton et Collins, 2014; Klein *et al.*, 2015; Mazure et Jones, 2015).

Historiquement, les inégalités sociales ont été responsables de la propagation de nombreuses épidémies dans le monde, des problèmes économiques et des conflits (Charron, 2012). L'accès limité aux ressources pour certains groupes de la société a conduit à une division de cette dernière entre pauvres et riches, souvent associée à des

risques environnementaux et sanitaires accrus chez les groupes défavorisés. La même chose s'applique également à grande échelle, entre les pays.

Par ailleurs, les femmes font toujours face à plusieurs formes d'inégalités, par exemple en ce qui concerne l'accès au marché de travail et aux services de santé. De même, au niveau familial, les femmes ont toujours un rôle prépondérant dans la responsabilité des ménages (l'éducation des enfants, la santé de la famille, la socialisation, etc.) (Charron, 2012). Enfin, la recherche en écosanté devrait tenir compte aux différences qui existent entre les femmes et les hommes non seulement sur le plan biologique, mais aussi économique, social et culturel (Lebel, 2003).

Dans le présent projet, les impacts des puits inactifs sur la santé de la population peuvent différer d'un groupe de la société à un autre. Les facteurs favorisant ces inégalités sont aussi multiples, nous notons le genre, le sexe, l'âge, la profession, l'origine ethnique, le rang dans la société et l'état de la santé (Blaikie *et al.*, 2014). En effet, les enfants et les personnes sous traitement médical sont plus sensibles aux expositions aux contaminants environnementaux (Bonnet et Evrard, 2018; Chevalier, 2003; Kleinman, 2000). Nous avons donc pris ces deux groupes de personnes en compte en incluant les enfants de moins de 5 ans, les écoles et les hôpitaux comme composantes à l'étude. D'autre part, les personnes exerçant certaines professions sont plus vulnérables face aux effets des puits inactifs que d'autres, nous signalons ici les emplois liés au secteur de l'agriculture. Nous n'avons pas été en mesure d'inclure le genre et le sexe dans notre processus de recherche, mais nous l'abordons dans la discussion.

2.1.6 Du savoir à l'action

Les approches écosystémiques sont fondées aussi sur le principe du savoir à l'action. Le passage de la recherche à la pratique est un processus qui comprend la conception, le partage, la communication et l'application éthique et équitable des résultats de la

recherche (Charron, 2012). En fait, le concept a été utilisé dans de nombreuses disciplines et pas seulement dans le domaine de la santé. Cependant, il est évoqué à l'aide d'autres termes, tels que le transfert de technologie, la gestion des connaissances ou la gestion du changement (Tetroe, 2007). Les différences entre les appellations ne sont pas importantes, ce qui est important, c'est la façon dont ces termes sont appliqués (Tetroe, 2007).

Par ailleurs, les connaissances doivent être synthétisées au fur et à mesure des progrès de la recherche. Des chercheurs préconisent la méthode de l'entonnoir, qui propose que les résultats puissent être de plus en plus distillés avant d'être mis en application (Graham et al., 2006) citée par (Tetroe, 2007). Charron souligne que la recherche en écosanté a prouvé son efficacité en trouvant des solutions théoriques à de nombreux problèmes de santé publique, mais en même temps, elle estime que l'application des connaissances reste un vrai défi auquel les chercheurs et chercheuses en santé environnementale font face. Dans le même contexte, Charron propose que les résultats de la recherche soient mis en œuvre sur le terrain parallèlement à l'évolution du projet (si des solutions applicables sont disponibles), plutôt que d'attendre la fin du projet pour procéder au transfert des connaissances (Charron, 2012).

Dans le présent projet, la présence de puits inactifs pose des risques pour la santé de la population et pour l'environnement. Comme il est difficile d'estimer le risque, des solutions pour ce problème doivent être prises dans les plus brefs délais pour éviter le pire et pour répondre aux demandes de la communauté. Nous proposons une approche de gestion des puits inactifs qui pourrait être appliquée en Montérégie ou au niveau de la province afin de localiser les puits qui posent plus de risque pour la santé humaine et pour l'environnement. Nos résultats pour ce projet fourniront une classification des puits de la Montérégie qui pourrait être utilisée par les autorités locales, du moins pour déterminer quels puits devraient recevoir plus d'attention.

2.2 La vulnérabilité

La notion de vulnérabilité a été utilisée ces dernières années dans plusieurs domaines de recherche. Cependant, la définition de ce concept diffère d'un domaine à un autre et elle est liée au contexte de l'étude. En effet, il n'existe pas une définition universelle de la vulnérabilité et ses significations sont encore floues (Cutter, 1996). La définition la plus acceptée de la vulnérabilité est dérivée de l'origine du mot latin « *Vulnerare* » qui signifie « blesser », et à partir de là, Kates et ses collaborateurs ont défini la vulnérabilité comme « *la capacité d'être blessé* » (Kates *et al.*, 1985). Néanmoins, de nombreux scientifiques ont utilisé le terme pour exprimer un état d'incompétence et une incapacité d'un système à faire face aux dangers de toute nature. Il est donc essentiel de bien expliquer notre conception du terme dans le cadre de ce projet.

La vulnérabilité liée aux interactions entre les systèmes sociaux et les systèmes environnementaux (socioécologiques) a peu été abordée par les scientifiques. En 2003, Turner et ses collaborateurs ont proposé un nouveau cadre conceptuel pour le terme vulnérabilité. Ils ont caractérisé la vulnérabilité d'un système comme étant un résultat de l'exposition, de la sensibilité au stress qu'il subisse et de la capacité de supporter les conséquences de ce stress (Turner *et al.*, 2003). La vulnérabilité des systèmes socioécologiques à un événement stressant est donc constituée de trois composantes soit : l'exposition, la sensibilité et la capacité d'adaptation (Décamps, 2007; Eakin et Luers, 2006).

2.2.1 L'exposition

L'exposition aux sources de stress dépend essentiellement du contexte géographique et de la nature du stress (Becerra, 2012). Ainsi, les individus ne sont pas exposés de la même façon aux stress, certaines circonstances peuvent aggraver le risque ce qui augmente le degré d'exposition de ces personnes (Blaikie *et al.*, 2014). Cela nous

amène à dire que l'exposition est une composante qui contribue à la détermination de la vulnérabilité d'un système. L'exemple de Becerra (2012) peut davantage illustrer cette question. Becerra estime que les personnes pauvres ont été toujours considérées comme un groupe particulièrement vulnérable, mais les personnes vulnérables ne sont pas systématiquement pauvres, et l'exposition aux risques est le facteur décisif dans cette situation (Becerra, 2012).

Dans le cadre de notre projet, les systèmes biophysiques mais aussi socioéconomiques peuvent être exposés aux contaminants provenant des puits inactifs, peu importe leur nature (pétroliers ou gaziers). Cependant, le degré d'exposition dépend de plusieurs facteurs notamment la proximité de la source de pollution. À cet effet, de nombreux chercheurs ont tenté d'identifier le périmètre autour d'un puits de pétrole ou de gaz dans lequel les personnes seront en risque (Jackson *et al.*, 2013; Osborn *et al.*, 2011a; Tran *et al.*, 2020). Et c'est sur la base de ces études que les états définissent les distances qu'il faut laisser entre les sites de forage et les cours d'eau et toutes autres installations (zones urbaines, routes, voies ferroviaires, etc.).

2.2.2 La sensibilité

La sensibilité peut se traduire par les outils de défense que les systèmes adoptent afin d'augmenter leur résistance aux stress de toutes natures. Pour ce faire, les systèmes recourent à différentes méthodes en utilisant les moyens dont ils disposent pour développer cette forme de résistance. Les moyens susceptibles d'être utilisés diffèrent selon le contexte, la géographie et la nature du stress, ils peuvent être sociaux, économiques, institutionnels ou politiques (Décamps, 2007).

Dans le cadre de ce projet, les puits inactifs représentent un risque pour la population à différentes échelles. Cependant, durant les dernières années, on a assisté à une résistance bien évidente de la population québécoise qui a recouru à plusieurs outils politiques à travers les élus (les députés) qui ne cessent de demander au gouvernement

de trouver une solution aux puits inactifs (Bastin, 2018; Québec Solidaire, 2016), et sociaux moyennant les regroupements citoyens à l'image de RVHQ et AQLPA qui avaient même procédé à des inspections volontaires des puits inactifs sous l'initiative "chasseurs de puits inactifs" (Bourdillon, 2017; Filteau, 2018).

2.2.3 La capacité d'adaptation

La capacité d'adaptation, aussi appelée la résilience, se traduit par la capacité d'un groupe de résister aux impacts négatifs d'un stress et à récupérer son statut initial rapidement (Wisner et al., 2003) cité par (Blaikie *et al.*, 2014). Cependant, au sein d'une société, la capacité d'adaptation est inégalement répartie sur les membres de la communauté, voire même de la même famille. Ceci peut créer des groupes qui ont plus de chance de subir les dommages des dangers que d'autres (Blaikie *et al.*, 2014). Les facteurs influençant ces inégalités peuvent être liés au sexe, à l'âge, à l'ethnicité, à l'état de santé, à la classe sociale, la caste et le statut d'immigration (Blaikie *et al.*, 2014).

Dans le cadre de notre projet, les personnes pratiquant l'agriculture, les enfants et les personnes immunodéprimées forment des groupes plus vulnérables aux effets potentiels des puits inactifs. Par exemple, les enfants, en plus d'être plus exposés aux polluants (particulièrement aux contaminants atmosphériques), parce qu'ils respirent plus d'air que les adultes, ont une faible capacité pour faire face aux perturbations en raison de la faiblesse de leur système immunitaire en développement (Kleinman, 2000).

2.2.4 Les facteurs de vulnérabilité

D'abord, dans le cadre de ce travail, nous avons décidé de prendre en compte tous les risques qui sont susceptibles de se produire dans les puits de pétrole ou de gaz inactifs en se basant sur les études qui ont confirmé que même si les puits sont fermés selon les réglementations, il peut y avoir des fuites de contaminants (McMahon *et al.*, 2018). Par conséquent, les facteurs de vulnérabilité retenus seront de la même importance.

Comme nous l'avons déjà mentionné, il est difficile de déterminer la vulnérabilité tant des systèmes biophysiques que socioéconomiques face aux risques, en raison du nombre élevé de facteurs pouvant entrer en interaction. Afin d'identifier les facteurs à recruter dans le cadre de cette étude, nous avons eu recours à l'étude d'Esterhuysen et ses collaborateurs (2017) qui avaient utilisé la cartographie de la vulnérabilité comme outil pour recenser les effets sur les écosystèmes de l'extraction des gaz de schiste en Afrique du Sud, et ce, pendant que le gouvernement étudiait la possibilité d'autoriser de tels projets (Esterhuysen *et al.*, 2017). De nombreux chercheurs et experts provenant de diverses disciplines avaient contribué à cette étude. L'équipe de recherche, en se basant sur une approche d'analyse des impacts, avait finalement identifié les eaux souterraines et de surface, la végétation, les facteurs socioéconomiques et la sismicité comme thèmes de vulnérabilité pouvant faire face aux différents effets de l'extraction des gaz de schiste (Esterhuysen *et al.*, 2017). Pour notre projet, la projection sur le contexte québécois nous a obligé à exclure la sismicité, car ceci est lié essentiellement aux tremblements de terre pouvant survenir à cause de la fracturation hydraulique, de sorte qu'il n'y a que quelques puits de ce type au Québec. D'autre part, nous avons ajouté les écoles et les hôpitaux comme variables à l'étude en raison de la vulnérabilité des personnes qui fréquentent ces établissements. Enfin, les chemins de fer ont été ajoutés à cause de la proximité de certains puits inactifs à ces infrastructures.

CHAPITRE III

MÉTHODOLOGIE

La méthodologie utilisée dans le cadre de ce mémoire repose sur la cartographie et l'analyse multivariée de données quantitatives. Elle est présentée en cinq volets principaux : la zone d'étude, les logiciels, les variables à l'étude et source de données, la cartographie des variables à l'étude, et enfin l'analyse de données. Nous produisons tout d'abord un portrait des principales caractéristiques géographiques et socioéconomiques de notre région d'étude. Ensuite, nous présentons les logiciels que nous avons utilisés pour la collecte, le traitement et l'analyse de données. Dans la troisième partie, nous décrivons les variables utilisées pour cartographier la vulnérabilité de l'environnement naturel, bâti et humain ainsi que les sources de données utilisées pour y arriver. Dans la partie cartographie des variables, nous expliquons la méthode employée pour l'analyse cartographique. Enfin, nous exposons la méthode d'analyse des résultats de la cartographie.

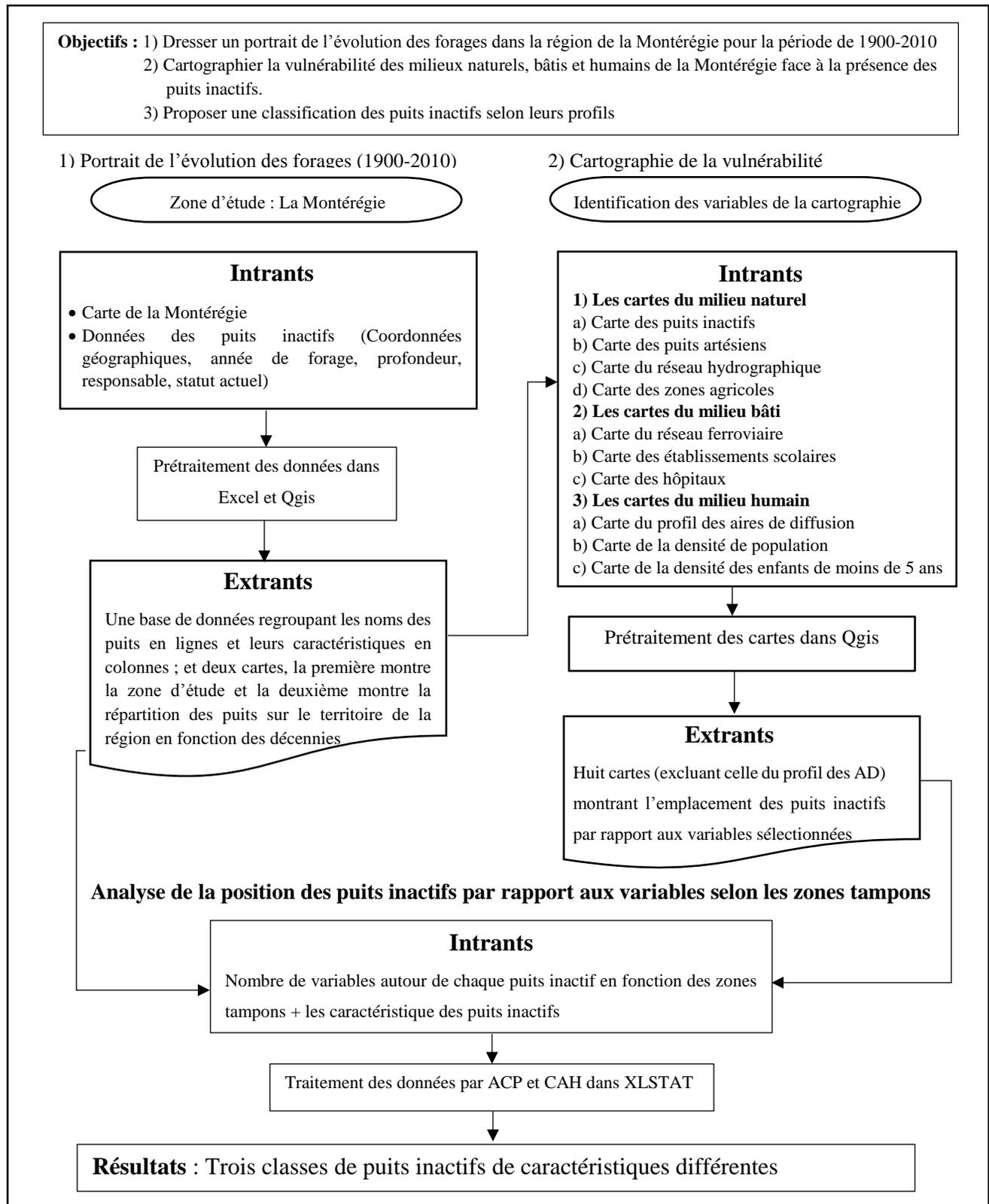


Figure 3.1 Démarche méthodologique

3.1 La zone d'étude

Nous avons choisi la région de la Montérégie au Québec comme zone d'étude. La Montérégie correspond à la région administrative numéro 16 du Québec. Située au sud de la province, elle est bordée au nord-est par la région Centre-du-Québec, à l'est par l'Estrie, au sud par les frontières américaines et à l'ouest par le fleuve Saint-Laurent (Figure 3.1). Elle s'étend sur une superficie de 11 112 km² et sa population totale est de 1 582 067 habitants; 82% d'entre eux ont 64 ans et moins (recensement de l'année 2019) (Gouvernement du Québec, 2020). Elle est composée de 15 municipalités régionales de comté (MRC) dont Longueuil, Roussillon, Vaudreuil-Soulanges, La Vallée-du-Richelieu et Le Haut-Richelieu, qui sont respectivement les cinq MRC les plus peuplées. La Montérégie comporte 177 municipalités locales et deux réserves autochtones, Kahnawake et Akwesasne (Gouvernement du Québec, 2019A).

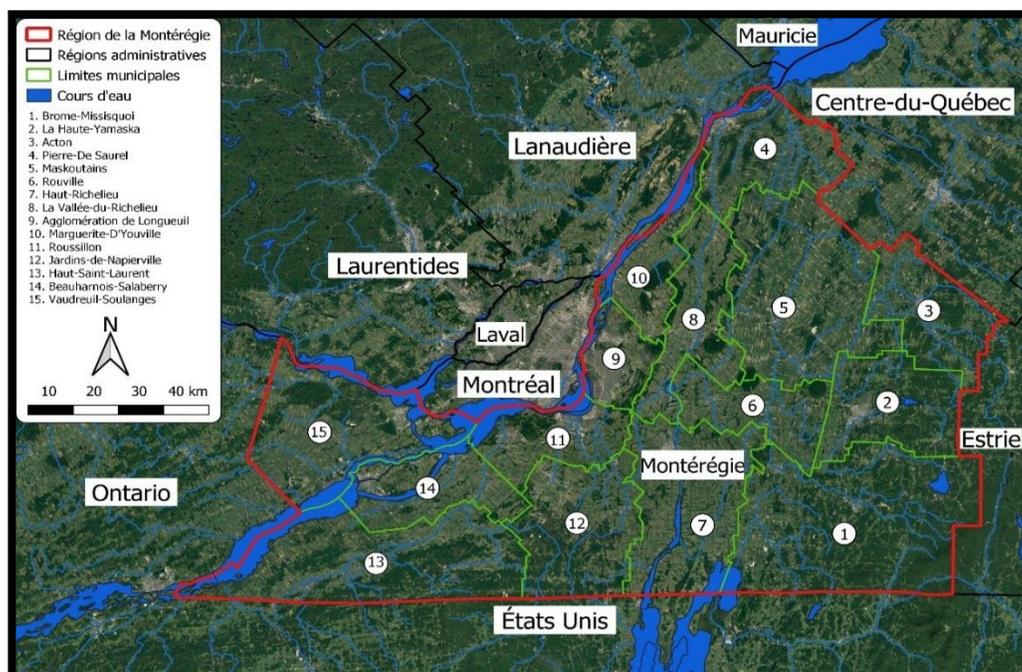


Figure 3.2 Localisation géographique de la région de la Montérégie et ses MRC (Source : Données Québec)

Du côté de l'économie, la région est surnommée le « garde-manger du Québec » en raison de ses grandes capacités de production et de transformation alimentaire. Les zones agricoles constituées de bons sols représentent 82% de la superficie totale de la région qui bénéficie en plus d'un climat favorable à la culture. D'autre part, la région encourage plusieurs industries telles que l'industrie mécanique, chimique, électronique, métallurgie, sidérurgie et touristique (Gouvernement du Québec, s.d.).

Depuis plus d'un siècle, la Montérégie a été un champ d'exploration pétrolière comme la plupart des régions du Québec. Aujourd'hui, le Québec compte environ 920 puits forés sur son territoire, certains ont été fermés définitivement (inactifs), tandis que d'autres ont été fermés temporairement (MERN, 2019d). Dans le cadre de ce projet, nous nous intéressons uniquement aux puits inactifs qui ont été fermés définitivement dans la région de la Montérégie.

3.2 Logiciels

Pour le traitement des données géospatiales, nous avons utilisé Qgis 3.12.0 qui est un système d'information géographique (SIG) offert sous licence publique générale (GNU). Le logiciel permet de créer, éditer, visualiser, analyser et publier des données géospatiales. D'autre part, Qgis nous donne la possibilité de créer des bases de données ou encore extraire des informations à partir des tables d'attributs des couches vectorielles. De plus, Qgis propose des outils d'analyse de données spatiales, des outils d'analyse vectorielle, de géotraitement et de géométrie. Enfin, il existe un très grand nombre d'extensions qui peuvent être installées selon les besoins du projet (Sutton *et al.*, 2004).

Nous avons également utilisé Excel pour le traitement des données provenant des tables attributaires des couches géospatiales, ainsi que pour regrouper les données des puits inactifs extraites de différentes bases de données ministérielles.

Finalement, l'ensemble des données a été projeté en MTM, Nad83 fuseau 8 (EPSG :2950) afin d'uniformiser le tout, car certaines opérations qui exigent de préciser des distances (ex. zone tampon, etc.) ne fonctionnent qu'avec les coordonnées en unités de longueur et non des degrés.

Pour analyser les données des puits inactifs et celles de la cartographie, nous avons eu recours au logiciel XLSTAT 2020.4.1 qui est utilisé pour les statistiques multivariées. Le logiciel est basé sur un nombre important de méthodes statistiques reconnues. Ce logiciel permet de préparer, décrire, analyser et modéliser des données (Addinsoft, 2020). Nous avons utilisé XLSTAT principalement pour effectuer une analyse en composantes principales (ACP) et une classification ascendante hiérarchique (CAH).

3.3 Variables à l'étude et sources de données

Les variables à l'étude sont regroupées en quatre catégories principales : 1) les données relatives aux puits de pétrole et de gaz inactifs, à savoir le nom des puits, la date de forage, la date d'abandon, les coordonnées géographiques, la profondeur, le responsable, et le statut actuel, 2) l'environnement naturel qui comprend l'eau souterraine (représentée par les puits artésiens), l'eau de surface et les zones agricoles, 3) l'environnement bâti qui inclut le réseau ferroviaire, les établissements scolaires et les hôpitaux, 4) l'environnement humain qui inclut la densité de la population de toutes les catégories d'âges et la densité des enfants de moins de 5 ans.

3.3.1 Sources de données

Trois sources de données principales ont été utilisées dans le cadre de ce mémoire afin de fournir les informations nécessaires à chaque variable, soit le Système d'information géoscientifique pétrolier et gazier (SIGPEG), Données Québec et Statistique Canada. Les détails des bases de données sont présentés dans le tableau de métadonnées (Tableau 3.1).

Tableau 3.1 Tableau de métadonnées

Variable	Organisme	Format	Couverture géographique	Date de création	Date de mise à jour	Échelle	Projection	Identifiant	Source
Découpage administratif	MERN	ShapeFile	Tout le Québec	2019-03-13	2019-03-13	1/1M	EPSG :4269 - NAD83 - Géographique	ee928e60-5fef-488d-af37-099281a4e0e6	Données Québec
Puits artésiens	MELCC	GPKG	Tout le Québec	2020-01-22	2020-06-08	Inconnue	Géographique NAD83	2a0df569-5b31-49ea-a558-89b3e4c933d6	Données Québec
Cours d'eau	MERN	ShapeFile	Tout le Québec	2001-01-15	2009-03-27	1/1M	Inconnue	1f2065a4-314f-4740-b091-43ac9e9e7019	Données Québec
Zones agricoles	CPTAQ	ShapeFile	Tout le Québec	2015-12-17	2019-01-31	1/20K	Inconnue	1cdd5d3d-191a-4ceb-a8e8-8fba47fd3a83	Données Québec
Réseau ferroviaire	MTQ	ShapeFile	Tout le Québec	2016-11-07	2016-11-07	Inconnue	EPSG :4326	bdf44b86-acdb-4e81-b4aa-0b0232e0a47f	Données Québec
Écoles	MEES	CSV.	Tout le Québec	2017-10-31	2020-09-14	1/20K	WGS 1984 Web Mercator (EPSG 3857)	2a8ef3bc-6096-4675-ac76-ff60b33744a4	Données Québec
Hôpitaux	MSSS	CSV.	Tout le Québec	2020-04-03	2020-07-27	Inconnue	EPSG :3798 - NAD83 / MTQ Lambert	a1988030-1f8b-4c67-bc29-ca8b9f710afd	Données Québec
Puits inactifs	MERN	/	Tout le Québec	/	/	/	/	/	SIGPEG

3.3.1.1 Le Système d'information géoscientifique pétrolier et gazier (SIGPEG)

Au Québec, le MERN est la seule autorité à disposer de tous les documents relatifs aux puits de pétrole et de gaz, tels les fiches techniques, les rapports de forage, les rapports d'abandon, les rapports d'inspection, etc. Ces documents sont publiés dans diverses bases de données ministérielles, dont le SIGPEG.

Le SIGPEG est accessible depuis le site internet officiel du MERN (<http://sigpeg.mrn.gouv.qc.ca/gpg/classes/igpg>). À partir de cet outil, il est possible de réaliser des recherches sur des données publiques, commander, effectuer et payer des demandes d'accès à l'information, sur des produits diffusés par le MERN. Dans le cadre de ce projet, nous l'avons utilisé pour extraire les informations relatives aux puits inactifs. Pour ce faire, nous avons eu recours à la base de données "Puits forés" afin d'obtenir des informations sur l'année de forage, l'année d'abandon, les coordonnées géographiques, le détenteur du permis d'exploration ou l'opérateur et le statut actuel du puits. Ces informations ont été récupérées à partir des fiches techniques et des rapports de forages.

3.3.1.2 Données Québec

Données Québec est une plateforme de partage de données ouvertes d'intérêt public, accessible directement depuis son site internet <https://www.donneesquebec.ca>. Elle permet à tout organisme soit le gouvernement, les municipalités ou tout autre regroupement ou organisation de diffuser leurs données sur son site (Données Québec, 2020). Dans le cadre de ce mémoire, nous l'avons utilisé comme moteur de recherche pour extraire des informations liées aux variables suivantes : les eaux souterraines, les eaux de surface, les zones agricoles, le réseau ferroviaire, les établissements scolaires et les hôpitaux.

Eau souterraine

Pour le moment, la cartographie des ressources aquifères au Québec n'est toujours pas disponible, à l'exception de certains projets d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES) lancés par le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC, s.d.-a). Cependant, ces projets soit ne couvrent pas entièrement le Québec ou sont en cours d'exécution. Dans le cadre de ce mémoire, nous avons choisi de déterminer dans quelle mesure les personnes pourraient être exposées à une contamination potentielle des eaux souterraines provenant des puits de pétrole ou de gaz inactifs, par la présence de puits artésiens dont ils dépendent. En fait, ce sont les puits artésiens qui permettent aux personnes d'accéder aux eaux souterraines en tant que source d'eau potable. D'autre part, les puits artésiens (appelés aussi les forages d'eau ou puits d'eau) ont été utilisés pour vérifier la qualité des eaux souterraines dans de nombreuses études hydrologiques, comme celles de Osborn (2011) et Jackson (2013).

Nous avons utilisé la carte des puits artésiens diffusée par le système d'information hydrogéologique (SIH) (<http://www.sih.environnement.gouv.qc.ca/index.html>). Le SIH est une banque de données appartenant au MELCC qui donne une description détaillée des différents puits artésiens servant à alimenter les résidences privées en eau potable (MELCC, s.d.-b). L'outil fournit de nombreuses informations relatives aux puits artésiens, telles que le nom du puits, l'entreprise chargée du forage, la date du forage, la profondeur, l'adresse postale (pour les puits forés dans des maisons) et les coordonnées géographiques. Ces données proviennent principalement des rapports de forage envoyés par les puisatiers. Les données de cette base sont mises à jour tous les soirs (MELCC, s.d.-b). Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé la version du 8 juin 2020.

Eau de surface

En général, l'eau de surface (appelée aussi eau superficielle) est l'eau qui se trouve en contact direct avec l'atmosphère (en surface). Par conséquent, elle inclut les ruisseaux, les rivières, les lacs, les océans et les mers. Dans le cadre de ce mémoire, nous avons choisi d'étudier le fleuve Saint-Laurent séparément des autres sources d'eau superficielle, comme c'est le cas dans diverses études menées par le MELCC, compte tenu de son importance patrimoniale au Québec (MDDEP, 2012).

Nous avons utilisé la base de données géographiques et administratives du MERN accessible via Données Québec afin d'obtenir les données sur les eaux de surface pour l'ensemble du territoire québécois. Cette base de données offre une collection de cartes à l'échelle 1 :1 000 000 y compris la carte des eaux de surface. Le fichier que nous avons téléchargé contenait deux couches d'eau de surface en format Shapefile. La première couche inclut les différents types de cours d'eau à savoir les ruisseaux et les rivières, tandis que la deuxième comporte les lacs, les îles, le fleuve Saint-Laurent, la rivière des Outaouais et la rivière Richelieu. Il est à noter que ces cartes ont été créées en 2012.

Zones agricoles

La carte des zones agricoles comprend toutes les terres arables du Québec, principalement dans les régions du sud, dont la région de la Montérégie, le long du fleuve Saint-Laurent et dans d'autres régions. Cette carte a été produite en 2012 par la Commission de protection du territoire agricole du Québec (CPTAQ), sur la base de plusieurs références, dont la Base de données topographiques du Québec (BDTQ) à l'échelle 1:20 000, la compilation cadastrale à l'échelle 1:20 000 et les cartes officielles de la limite de la zone agricole (CPTAQ, s.d.). En termes de superficie, les zones agricoles représentent 86% (953 402 hectares) du territoire de la Montérégie, ce qui

place cette région au premier rang du classement des régions contribuant le plus à la production agricole au niveau provincial, avec 30% du PIB agricole au Québec (MAPAQ, 2012). Par conséquent, il n'a pas été possible d'éliminer de la carte les terres agricoles se situant dans les régions administratives autres que la Montérégie.

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé la carte selon la mise à jour du 31 janvier 2019.

Réseau ferroviaire

La carte du réseau ferroviaire du Québec représente un réseau linéaire montrant les voies ferrées de la province. Sa géométrie est conçue à partir de la géobase ferroviaire fédérale ainsi que d'autres sources. La carte a été produite par le ministère des Transports (MTQ) en 2016 (Données Québec, 2016).

En effet, l'industrie du transport ferroviaire joue un rôle important dans l'économie québécoise. Le réseau compte 6 278 km de voies ferrées qui font partie du grand réseau ferroviaire nord-américain (MTQ, 2014). Ces rails sont exploités essentiellement pour transporter des marchandises, des passagers ou les deux. De plus, ces voies ferrées appartiennent à des entreprises publiques (fédérale ou provinciale) ou à des entreprises privées qui transportent leurs propres produits (MTQ, 2014).

Établissements scolaires

La carte des établissements scolaires fournie par le ministère de l'Éducation et de l'Enseignement supérieur (MEES) contient plusieurs couches en format Shapefile qui représentent les différents établissements appartenant au secteur de l'enseignement partout au Québec. Nous avons pris en considération uniquement les écoles publiques, les écoles privées et les écoles gouvernementales (écoles gérées par le gouvernement fédéral dans les communautés autochtones). Ces écoles comprennent cinq niveaux

scolaires : préscolaire, primaire, secondaire, éducation aux adultes et formation professionnelle.

Dans le cadre de notre étude, nous avons choisi de prendre en compte seulement les niveaux préscolaire, primaire et secondaire de la région de la Montérégie. Le choix de ces catégories d'écoles est lié principalement à l'âge des enfants fréquentant ces établissements. Selon les règles du MEES, les élèves du secondaire ne doivent pas dépasser 18 ans. Par ailleurs, l'éducation préscolaire est offerte aux enfants ayant cinq ans au plus tard le 30 septembre de chaque année (MEES, 2020). Dans ce cas, nous nous retrouvons avec un groupe de personnes âgées de cinq à 18 ans. Nous avons donc utilisé l'outil de sélection des entités afin de sélectionner seulement les établissements se situant en Montérégie. Ensuite, à l'aide des outils de modification des tables d'attributs, nous avons supprimé les écoles d'éducation aux adultes et de formation professionnelle. Cependant, dans certains cas, nous avons trouvé plus d'un niveau dans le même établissement, par exemple : préscolaire et primaire, préscolaire et secondaire, primaire et secondaire ou encore les trois niveaux préscolaires, primaires et secondaires. Dans ces cas, nous les avons considérés comme un seul établissement. Par ailleurs, dans d'autres cas, nous avons trouvé un de ces trois niveaux (préscolaire, primaire ou secondaire) dans le même établissement avec un autre niveau (éducation aux adultes ou formation professionnelle), dans ce cas, nous ne les avons pas exclus de la recherche. Finalement, nous avons sauvegardé ces modifications afin de produire une nouvelle carte des établissements scolaires de la Montérégie contenant les trois niveaux choisis. Par ailleurs, la liste des établissements scolaires est mise à jour périodiquement et dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé la version publiée le 27 juillet 2020.

Hôpitaux

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons choisi d'inclure les hôpitaux parmi les secteurs potentiellement vulnérables aux effets des puits inactifs, compte tenu des caractéristiques des personnes qui y séjournent. Ces personnes sont susceptibles de développer des complications suite à des expositions provenant de puits inactifs, notamment en raison d'une immunodépression.

Dans la base Données Québec, deux types de fichiers sont offerts par le ministère de la Santé et des Services Sociaux (MSSS) soit le fichier cartographique des établissements et le fichier cartographique des installations. Selon le MSSS, un établissement est « l'entité juridique dotée de capacités et de responsabilités légales, qui détiennent un permis du ministre de la Santé et des Services sociaux pour gérer des services correspondant aux cinq grandes missions définies dans la loi », alors que les installations sont « les lieux physiques où sont dispensés des soins de santé et de services sociaux à la population du Québec » (MSSS, 2004). Nous avons donc utilisé le fichier cartographique des installations le plus récent (mis à jour le 27 juillet) disponible en format Shapefile.

Le fichier inclut les différentes installations de soins et de services pour la population telles que les centres de service ambulatoires, les centres de services pour les aînés, les différents centres d'hébergement, les centres locaux de services communautaires, les différents foyers de groupes et les hôpitaux.

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons pris en considération seulement les hôpitaux. On entend par hôpital tout établissement hospitalier dans lequel les malades peuvent séjourner à l'exception des centres d'hébergement de soins de longue durée (CHSLD). Les centres de soin et les cliniques sont également exclus de cette recherche. Nous avons donc utilisé l'outil de modification des tables d'attributs afin de supprimer les

autres installations et de laisser que les hôpitaux de la région de Montérégie. Cependant, nous avons découvert que le nombre d'hôpitaux présents dans la table des attributs était supérieur au nombre réel désigné par le MSSS. Après comparaison avec la liste des établissements publiée sur le site du ministère, nous avons trouvé deux hôpitaux qui appartiennent à la région de l'Estrie, mais qui ont été positionnés en Montérégie. D'autre part, nous avons constaté que certains hôpitaux comprenaient d'autres bâtiments dans lesquels ils fournissent des services de santé à la population (annexes), mais qui sont situés loin du site principal. Dans ce cas, nous avons supprimé les deux hôpitaux de la région de l'Estrie, tout en laissant les annexes appartenant aux hôpitaux de la Montérégie.

3.3.1.3 Statistique Canada

La base de données Statistique Canada est gérée par le gouvernement fédéral et a pour mandat de présenter les informations provenant de recensement, qui se fait tous les cinq ans et qui touche toute la population canadienne. Il fournit une masse de renseignements sur l'économie, l'environnement et la société pour le Canada et pour chacune des provinces (Gouvernement du Canada, 2020b). Nous avons accédé à cette base de données à partir du site web de la bibliothèque de l'UQAM, qui à son tour nous a dirigés vers un site développé par les bibliothèques universitaires québécoises. Ce dernier nous a donné accès aux données géographiques et statistiques du Canada et du Québec. L'outil permet de télécharger les données de recensement en fonction de plusieurs unités géographiques, dont les aires de diffusion (AD), ainsi que le profil des AD de tout le Canada.

Une AD est définie selon gouvernement du Canada comme étant «... une petite unité géographique relativement stable formée d'un ou de plusieurs îlots de diffusion avoisinants ...» (Gouvernement du Canada, 2018). Le choix de cette unité géographique est dû au fait qu'il s'agit de la plus petite unité disponible via le site consulté. Il aurait été possible de travailler avec des unités plus fines (ID-Ilot de

diffusion ou encore Côté d'îlot), mais ceci aurait exigé une demande spéciale et n'aurait pas nécessairement apporté beaucoup plus de précision.

Enfin, la base de données de Statistique Canada (également désignée sous le nom de StatCan) a été exploitée pour recueillir les informations nécessaires sur la densité de population montréalaise de toutes les catégories d'âges et la densité des enfants de moins de 5 ans en particulier, en fonction des AD. Dans le cadre de ce mémoire, nous avons utilisé les données du dernier recensement qui a eu lieu en 2016.

3.4 Cartographie des variables à l'étude

3.4.1 Création de la base de données des puits de pétrole et de gaz inactifs

Tout d'abord, nous avons utilisé la fonction de « découpage administratif » de la carte interactive des hydrocarbures afin de délimiter la région de la Montérégie. Ensuite, nous avons eu recours à l'outil de sélection des puits à afficher sur la carte selon leur statut actuel (planifié, en cours de travaux, production, d'observation, inconnu, fermé temporairement et fermé définitivement). Ce dernier nous a permis d'afficher uniquement les puits fermés définitivement « inactifs » de la Montérégie. À partir de cette carte, nous avons pu déterminer les noms des puits que nous avons utilisés plus tard comme point de départ pour la création de la base de données qui regroupe toutes les informations disponibles sur les puits inactifs.

Comme les informations sur les puits inactifs ne sont pas disponibles sous format téléchargeable, nous avons dû les extraire manuellement à partir des fiches techniques. Une importance particulière a été accordée aux coordonnées géographiques des puits afin d'éviter les erreurs pouvant survenir lors de la transcription. Les coordonnées ont été traitées manuellement pour corriger, vérifier et parfois les convertir en degré décimal (DD), le format compatible avec Qgis. Cependant, nous avons trouvé des puits qui avaient les mêmes coordonnées géographiques, avec des caractéristiques

différentes (année de forage, responsable, profondeur). Dans ce cas, nous avons décidé de prendre le puits le plus profond, car il s'agit peut-être des puits qui ont été reforés à plusieurs reprises afin d'aller chercher les hydrocarbures dans des couches plus profondes (techniquement appelés « ré-entré »).

Enfin, nous avons créé sur Excel une base de données qui regroupe toutes les informations nécessaires sur les puits inactifs de la Montérégie, chaque ligne représentant un puits et chaque colonne représentant les variables suivantes : année de forage, année d'abandon, responsable, profondeur, état, coordonnées géographiques (latitude et longitude), statut actuel. Cette base de données a été utilisée pour créer la carte des puits de pétrole et de gaz inactifs.

3.4.2 Analyse spatio-temporelle des forages pétroliers et gaziers

Pour analyser l'évolution des forages pétroliers et gaziers en Montérégie, nous avons catégorisé les puits selon leurs années de forage. Chaque catégorie s'étend sur dix ans. Ensuite, nous avons localisé les puits inactifs sur la carte de la Montérégie en fonction des catégories (par décennie). Nous avons utilisé un code de couleurs afin d'identifier les puits de chaque décennie. Enfin, nous avons pu procéder à une analyse spatiale à partir de la carte montrant la répartition des puits sur le territoire de la Montérégie.

3.4.3 Création des zones tampons et méthodes d'analyse

Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi de caractériser les variables à l'étude sur une distance de 1000 m des puits inactifs. Pour ce faire, nous avons utilisé l'outil de géotraitement « Tampon » afin de créer des zones tampons de 250 m, 500 m, 750 m et 1000 m autour de chaque puits inactif. Le processus consiste d'abord à choisir une couche source (la carte des puits inactifs). Ensuite, il a été nécessaire d'indiquer la distance de rayon (250 m, 500 m, 750 m, 1000 m) de la zone tampon que nous voulions créer. L'exécution de cet algorithme a généré quatre nouvelles couches (une couche

pour chaque zone tampon), dont les tables d'attributs contiennent les mêmes données que celles de la couche des puits inactifs.

Pour les puits artésiens, les écoles, les hôpitaux, nous avons utilisé l'outil d'analyse "*Count points in polygon*" qui permet de compter le nombre de points présents dans un polygone choisi (les zones tampons). L'exécution de cette fonctionnalité a généré quatre nouvelles couches de polygones par variable (une couche pour chaque zone tampon), dont les tables d'attributs contiennent exactement le même contenu que la couche polygone en entrée (les données des puits inactifs), avec un champ supplémentaire montrant le nombre de points trouvés. Cette approche est plus sûre, car elle tient compte les informations de la table d'attributs des variables et non de ce qui est affiché dans l'écran du logiciel car, dans certain cas il peut y avoir deux points proches l'un de l'autre, de sorte que nous les voyons un seul. Cette fonctionnalité a été utilisée pour éviter les erreurs de calcul.

Pour les cours d'eau, le fleuve Saint-Laurent, les voies ferroviaires et les zones agricoles, nous avons utilisé une approche qui consistait à identifier l'ensemble des puits inactifs ayant au moins une composante par variable dans l'une des zones tampons. Dans les cas où une variable qui traversait plus d'une zone tampon, elle n'a été comptée que pour la zone tampon adjacente aux puits. En d'autres termes, si un cours d'eau passait dans la zone de 250 m et dans celle de 500 m, il n'a été calculé que pour la zone de 250 m. La Figure 3.2 montre trois exemples de puits inactifs et la façon dont la position des variables a été analysée.

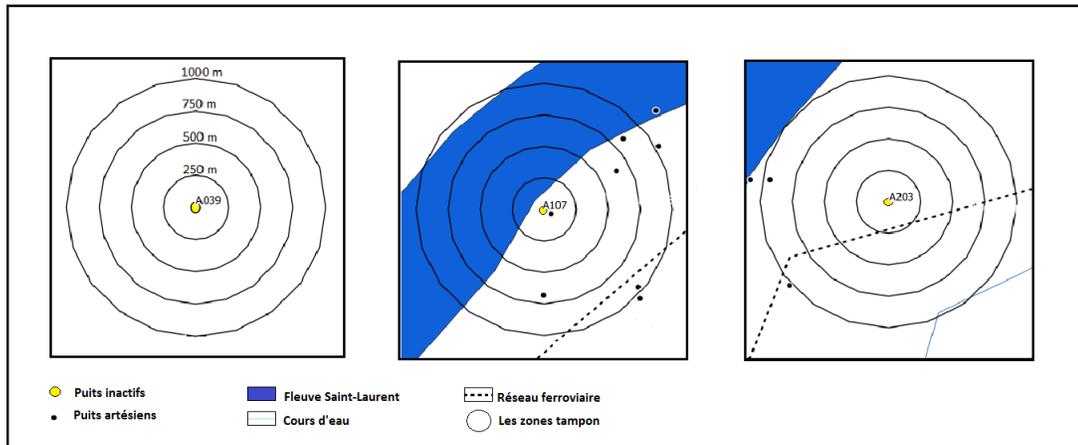


Figure 3.3 Position des puits inactifs avec leurs zones tampons par rapport aux variables de la cartographie

Enfin, pour l'environnement humain, nous avons utilisé l'outil de jointure afin de joindre les données de recensement téléchargées en format (.csv) avec la couche des AD de la Montérégie. Ensuite, nous avons catégorisé la densité de population en six classes : 0, >0 à 1000, >1000 à 2000, >2000 à 3000, >3000 à 4000 et >4000, représentées par des couleurs dégradées. En revanche, il n'a pas été possible d'obtenir la densité des enfants de moins de 5 ans au km² pour chacune des AD. Quand il s'agit du recensement de la population par catégorie d'âge, Statistique Canada ne fournit que le nombre de personnes par AD. Pour calculer la densité des enfants de moins de 5 ans, il nous a fallu trouver la surface de chaque AD. Pour cela, nous avons utilisé l'outil géométrie « \$area » de Qgis.

Après avoir calculé la superficie, nous avons pu obtenir la densité au km² des enfants de moins de 5 ans de chaque AD en utilisant l'équation (1). Ensuite, nous avons joint ces données à la table d'attributs. La densité a été catégorisée en six classes : 0, >0 à 50, >50 à 100, >100 à 150, >150 à 200 et >200, représentés par des couleurs dégradées.

$$Densité = \frac{\text{Nombre de personnes}}{\text{Surface}} \dots \dots (1)$$

3.5 Analyses de données multivariées

Les travaux de cartographie nous ont permis d'élaborer une base de données assez complète, où chaque ligne représente un puits inactif et où les caractéristiques de ces puits ainsi que les résultats obtenus pour chaque variable sont présentés dans 35 colonnes.

3.5.1 Analyse en composantes principales (ACP)

Les données ont d'abord été traitées dans Excel afin d'uniformiser les valeurs obtenues. Ensuite, nous avons procédé à une analyse en composantes principales (ACP). En effet, l'ACP est une méthode statistique qui consiste à comprendre la structure d'une matrice de données, en d'autres termes, comprendre la relation variables-observations, variables-variables et la relation entre les observations en elles-mêmes (Stafford et Bodson, 2006). Cette technique d'analyse permet entre autres de réduire la dimension d'un jeu de données en créant un second jeu de données de plus petite dimension constitué de nouvelles variables qui sont des ensembles linéaires des variables initiales (Tharrault, 2008). Cependant, la validité de l'ACP dépend de la richesse de la matrice de données en entrée (Cao et Gertler, 2002).

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons utilisé l'ACP afin d'identifier les relations linéaires existantes entre les puits inactifs en fonction des variables du système en utilisant le logiciel XLSTAT 2020.4.1. Tout d'abord, afin d'éviter de confondre les variables, nous avons dû codifier ces dernières en fonction du nom et de la zone tampon. Les variables ainsi que leurs codes associés sont présentées dans le Tableau 3.2. Au total, nous avons obtenu un tableau constitué de 133 lignes représentant les puits inactifs, et de 35 colonnes incluant 33 variables quantitatives et deux variables qualitatives (responsable et municipalité). Étant donné que notre analyse est basée principalement sur le nombre et le type des variables de la cartographie signalées autour de chaque

puits inactif, nous avons considéré les caractéristiques des puits telles que : la profondeur, l'année de forage, l'année d'abandon, la compagnie et la municipalité où se trouve le puits, comme des variables supplémentaires à ajouter pour la matrice de données. Après un traitement des variables sur Excel, nous avons constaté que les deux colonnes HO1 et HO4 (Hôpitaux dans la zone de 0-250 m et Hôpitaux dans la zone de 750-1000 m) contenaient des valeurs constantes (=0) pour l'ensemble des puits inactifs. Dans ce cas, nous les avons exclus de l'analyse, car elles n'auront aucun effet sur les résultats de l'analyse. Nous dénombrons donc 28 variables actives et cinq variables supplémentaires. Enfin, nous avons choisi la méthode de corrélation de Pearson pour l'analyse de données.

Afin de vérifier la pertinence de notre jeu de données pour l'ACP, nous avons procédé au test de Kaiser-Meyer-Olkin (souvent appelé le test KMO). Le KMO est un test qui mesure l'adéquation de la matrice de données d'une part pour chaque variable et d'autre part pour le modèle au complet. La valeur de KMO est toujours comprise entre 0 et 1 (Stafford et Bodson, 2006). L'interprétation du test proposée par Kaiser se fait comme suit :

- 0,9 et plus= très grande validité.
- 0,89 – 0,80 = grande validité.
- 0,79 – 0,70 = validité moyenne.
- 0,69 – 0,60 = validité insuffisante.
- 0,59 – 0,50 = validité misérable.
- 0,49 et moins = inacceptable.

Ensuite, nous avons effectué le test de sphéricité de Bartlett qui est une analyse statistique utilisée pour tester l'hypothèse nulle, de sorte que toutes les corrélations de la matrice de données seraient égales ou proches du zéro (Stafford et Bodson, 2006).

Tableau 3.2 Liste des codes associés aux variables utilisées pour l'ACP

Variable	Code
Puits artésiens dans la zone tampon de >0 à 250m	PA1
Puits artésiens dans la zone tampon de >250 à 500m	PA2
Puits artésiens dans la zone tampon de >500 à 750m	PA3
Puits artésiens dans la zone tampon de >750 à 1000m	PA4
Cours d'eau dans la zone tampon de >0 à 250m	CE1
Cours d'eau dans la zone tampon de >250 à 500m	CE2
Cours d'eau dans la zone tampon de >500 à 750m	CE3
Cours d'eau dans la zone tampon de >750 à 1000m	CE4
Zone agricole dans la zone tampon de >0 à 250m	CA1
Zone agricole dans la zone tampon de >250 à 500m	CA2
Zone agricole dans la zone tampon de >500 à 750m	CA3
Zone agricole dans la zone tampon de >750 à 1000m	CA4
Fleuve Saint-Laurent dans la zone tampon de >0 à 250m	FS1
Fleuve Saint-Laurent dans la zone tampon de >250 à 500m	FS2
Fleuve Saint-Laurent dans la zone tampon de >500 à 750m	FS3
Fleuve Saint-Laurent dans la zone tampon de >750 à 1000m	FS4
Chemins de fer dans la zone tampon de >0 à 250m	RF1
Chemins de fer dans la zone tampon de >250 à 500m	RF2
Chemins de fer dans la zone tampon de >500 à 750m	RF3
Chemins de fer dans la zone tampon de >750 à 1000m	RF4
Écoles dans la zone tampon de >0 à 250m	EC1
Écoles dans la zone tampon de >250 à 500m	EC2
Écoles dans la zone tampon de >500 à 750m	EC3
Écoles dans la zone tampon de >750 à 1000m	EC4
Hôpital dans la zone tampon de >0 à 250m	HO1
Hôpital dans la zone tampon de >250 à 500m	HO2
Hôpital dans la zone tampon de >500 à 750m	HO3
Hôpital dans la zone tampon de >750 à 1000m	HO4
Densité de la population	PT
Densité des enfants de moins de 5ans	ENF
Année de forage	AFO
Année d'abandon	AAB
Profondeur	PRO
Compagnie responsable	COM
Municipalité	MRC

Dans certains cas, en analysant les résultats initiaux de l'ACP, on remarque qu'il existe des variables qui saturent étrangement sur plus d'un facteur ou des variables avec des corrélations faibles, ce qui rend de l'interprétation des résultats très difficile. Dans ce cas, il est recommandé de procéder à une rotation orthogonale des axes, de façon à ce qu'on garde les coordonnées initiales du système de données en faisant pivoter (le plus souvent à 45°) la base orthogonale. Cette étape permet d'avoir des résultats plus simples et facilement interprétables (Stafford et Bodson, 2006). En ACP, on trouve plusieurs méthodes de rotation, cependant, la plus utilisée est bien "la rotation Varimax".

L'exécution des étapes précédentes nous conduit à obtenir en fin de compte les résultats de l'ACP à interpréter. Tout d'abord, il est essentiel de choisir le nombre de facteurs à retenir pour la suite de l'interprétation. Classiquement, la majorité des outils de traitement de données utilisent le « critère de Kaiser » pour la sélection des facteurs à garder pour l'interprétation des résultats de l'ACP. En utilisant cette approche, seuls les facteurs ayant une variance expliquée supérieure ou égale à 1 seront retenus. Pour plus de précision, le test du coude de Cattell permet une sélection plus sévère des facteurs à maintenir. Cette méthode consiste à tracer une courbe représentant les valeurs de la variance expliquée et identifier le point de rupture du diagramme. Par conséquent, on ne garde que les facteurs se situant avant le changement de la courbe (Cattell, 1966). L'explication des composantes consiste à analyser les saturations des variables sur les facteurs. Ces saturations ont des valeurs variant de -1 à 1. En règle générale, on ne peut estimer qu'une variable est représentative pour un tel facteur sauf si sa saturation sur ce dernier dépasse 0,3 en valeur absolue (CeSCuP, 2015).

3.5.2 La classification ascendante hiérarchique (CAH)

Les résultats de l'ACP ont été ensuite comparés aux résultats de la méthode de classification ascendante hiérarchique (CAH) (ou *hierarchical cluster analysis* en anglais). En effet, cette méthode est l'une des approches les plus importantes pour

explorer des données multivariées (Kassambara, 2017). Cette technique vise à regrouper ou à classer entre elles des variables similaires d'un jeu de données, afin que les groupes obtenus soient le plus homogènes possible et le plus dissemblables (Ward Jr, 1963).

La CAH utilise un algorithme qui cherche à identifier la distance entre les variables afin de les rassembler dans un même groupe. Plus les variables sont semblables, moins la distance entre elles est importante, deux variables similaires auront ainsi une distance nulle. Les variables identiques seront ensuite rassemblées itérativement pour former un dendrogramme (Joseph, 2019).

Dans le cadre de notre étude, la CAH basée sur l'approche de Ward a été utilisée comme méthode de clustering complémentaire pour confirmer et mieux présenter les résultats de l'ACP. Cependant, nous avons sélectionné dans « Options » les commandes « Centrer » et « Réduire » du logiciel XLSTAT afin d'éviter que les variables ayant plus de poids que les autres perturbent la construction des groupes.

CHAPITRE IV

RÉSULTATS

Les résultats de la recherche effectuée selon les objectifs et la méthodologie adoptée sont présentés dans ce chapitre. Au total, la recherche documentaire et cartographique nous a permis de répertorier 159 puits de pétrole ou de gaz qui ont été forés dans la région de la Montérégie pendant la période 1900-2010. Comme mentionné dans la méthodologie, le traitement de données nous a conduits à sélectionner uniquement 133 puits ayant le statut inactif.

Afin de répondre à notre premier objectif, nous avons élaboré une carte montrant l'évolution spatio-temporelle des puits inactifs. En bref, la majorité des forages ont été effectués dans le nord-ouest de la région (le long du fleuve Saint-Laurent), dont plus de la moitié ont été creusés entre 1960 et 1969. En deuxième lieu, les travaux de cartographie nous ont permis de produire un ensemble de cartes montrant la position des puits inactifs par rapport aux variables utilisées pour la cartographie. À cet effet, huit cartes ont été produites. Les résultats de l'analyse cartographique ont été illustrés dans des tableaux afin de faciliter l'exploitation de ces cartes. Enfin, l'analyse de données cartographiques moyennant l'ACP et la CAH nous a conduits à classer les puits inactifs en trois groupes de caractéristiques distinctes.

4.1 Cartographie des variables à l'étude

4.1.1 Données relatives aux puits de pétrole et de gaz inactifs

Nous avons répertorié 159 puits de pétrole et de gaz qui ont été forés dans la région de la Montérégie. À l'heure actuelle, il n'y a aucune activité pétrolière ou gazière dans cette région : 147 puits se trouvent en statut inactif (fermés définitivement) et 12 puits sont fermés temporairement. En excluant les forages multiples à un même endroit (réentré), nous dénombrons 133 puits inactifs distincts.

Selon les informations recueillies sur les puits inactifs, il est à noter que le premier puits dans la région de la Montérégie a été foré en 1905 et que l'exploration s'y est poursuivie jusqu'en 2010. Cependant, les informations concernant l'année de forage et l'année d'abandon montrent que 73 % des puits ont été fermés dans la même année de forage, 9% des puits inactifs avaient une durée de vie de un à cinq ans. Enfin, 9% des puits ont été exploités pour des périodes variant de six à 17 ans. Par ailleurs, nous n'avons pas été en mesure de déterminer la durée de service de 12 autres puits en raison du manque d'informations sur l'année de forage, l'année d'abandon, ou les deux. Enfin, seuls les puits forés après 2005 font l'objet de permis d'exploration. La durée de vie des puits est présentée au Tableau 4.3.

Nous avons remarqué que les puits inactifs en Montérégie ont été forés par 40 compagnies pétrolières différentes (Annexe A). Pour 90 puits inactifs, la compagnie détentrice du permis d'exploration est inconnue et seules les informations sur l'opérateur sont disponibles. En revanche, il y a 32 puits inactifs dont le propriétaire du permis d'exploration est connu et était celui qui avait réalisé les opérations de forage. Pour six puits inactifs, le titulaire du permis d'exploration est connu, mais une autre compagnie était chargée d'effectuer le forage. Enfin, nous avons constaté que cinq puits

ne disposaient d'aucune information sur l'entreprise qui détient le permis d'exploration ni sur celle qui a effectué les travaux.

La profondeur des puits inactifs variait entre 15 pieds et 13 921 pieds. Deux tiers des puits avaient une profondeur inférieure à 999 pieds, dont 40 puits ont été forés par la compagnie Les Huiles Prospères Inc. en 1963. Pour 38 des puits, les profondeurs allaient de 1000 à 4999 pieds. Enfin, seulement sept puits avaient une profondeur de plus de 5000 pieds et sont forés après 1972. Le Tableau 4.1 illustre la répartition des puits inactifs selon leur profondeur.

Tableau 4.1 Répartition des puits de pétrole et de gaz inactifs selon leurs profondeurs (Source :Sigpeg)

Profondeur (Pieds)	Nombre de puits	Pourcentage
>0 - 499	76	57 %
500 - 999	12	9 %
1000 - 1499	9	7 %
1500 - 1999	4	3 %
2000 - 2499	8	6 %
2500 - 2999	4	3 %
3000 - 3499	4	3 %
3500 - 4999	3	2 %
4000 - 4499	4	3 %
4500 - 4999	2	2 %
>5000	7	5 %

4.1.2 Analyse spatio-temporelle des puits inactifs

La Figure 4.1 illustre la distribution des puits inactifs. Cette carte montre que la majorité des puits ont été forés dans le nord et le nord-ouest de la région (proche du

fleuve Saint-Laurent), avec quelques puits forés au centre (à proximité de la rivière Richelieu).

L'analyse temporelle des forages montre que 71 puits inactifs ont été forés entre 1960 et 1969, ce qui représente la période de pointe dans l'histoire de l'exploration pétrolière dans cette région. La période de 1950 à 1959 a également été marquée par un nombre important de forages, 26 puits ayant été forés pendant cette décennie. Comme pour les autres périodes, le nombre de puits forés variait entre deux et dix par décennie, sauf pour la période de 1920 à 1929 où il n'y a pas eu de forages. Enfin, nous avons trouvé neuf puits forés dans cette région pour lesquels l'année de forage n'était pas disponible. Dans cette analyse nous n'avons pas exclu les puits qui ont été réentrés, car il s'agit d'une analyse du nombre d'opérations de forage effectuées entre 1900 et 2010. Le Tableau 4.2 présente le nombre de puits forés par décennies.

Tableau 4.2 Nombre de puits de pétrole et de gaz forés par décennie (Source :Sigpeg)

Période	Nombre de puits	Pourcentage	Nombre de réentrés
1900-1909	4	3 %	0
1910-1919	10	7 %	0
1920-1929	0	0	0
1930-1939	3	2 %	1
1940-1949	2	1 %	0
1950-1959	26	18 %	0
1960-1969	71	48 %	8
1970-1979	4	3 %	0
1980-1989	9	6 %	1
1990-1999	5	3 %	0
2000-2009	4	3 %	0
Inconnu	9	6 %	4

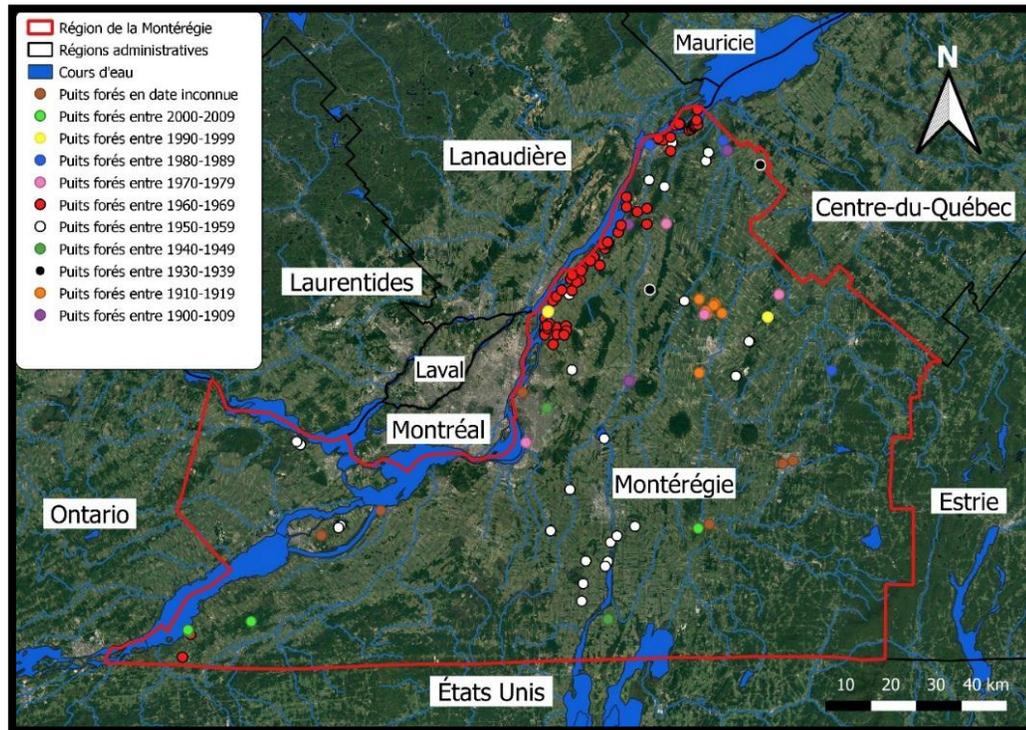


Figure 4.1 Évolution des forages pétroliers et gaziers de la Montérégie par décennie (Sources : Données Québec et Sigpeg)

Tableau 4.3 Données relatives aux puits de pétrole et de gaz inactifs forés dans la région de la Montérégie entre 1900-2010

Catégorie	Nombre de puits	Profondeur							Durée de vie					Responsables*	
		< 999	1000-1999	2000-2999	3000-3999	4000-4999	>5000	Médiane	<1	1-5	6-10	11-15	>15		Inconnue
1900-1909	4	0	1	2	1	0	0	2700	3	0	0	0	0	1	16-37
1910-1919	10	1	3	5	1	0	0	2175	5	4	0	0	0	1	8-12-23-37-41
1920-1929	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	/
1930-1939	3(1)	0	0	0	(1)	1	1	4140	2	(1)	0	0	0	0	9-11-28
1940-1949	2	0	0	1	0	1	0	3190.5	2	0	0	0	0	0	34-39
1950-1959	26	10	5	4	5	2	0	1481	18	2	2	0	0	4	3-4-7-10-15-17-20-21-22-26-35-40
1960-1969	71 (8)	71(8)	0	0	0	0	0	90	69(8)	2	0	0	0	0	5-18-19-24-25-30
1970-1979	4	0	0	0	0	1	3	7251.25	4	0	0	0	0	0	6-31-33
1980-1989	9 (1)	6(1)	1	0	0	1	1	692	1	2	0	0	6(1)	0	32-33-36-38
1990-1999	5	4	0	0	0	0	1	686	0	0	0	4	0	1	1-29
2000-2009	4	0	3	0	0	0	1	1369	1	2	1	0	0	0	2-13-27
Inconnu	9(4)	9(4)	0	0	0	0	0	300	0	0	0	0	0	9(4)	8-14-inc

(Compilation réalisée à partir des données extraites du Sigpeg)

* Les noms des responsables sont présentés dans l'Annexe A en fonction des numéros

Les chiffres entre parenthèses (n) représentent le nombre de puits réentrés

4.1.3 Cartographie de l'environnement naturel

4.1.3.1 Eau souterraine

La Figure 4.2 présente la distribution des puits artésiens. À partir de cette carte, nous remarquons que les puits artésiens ont été forés un peu partout sur le territoire de la région. D'ailleurs, les informations fournies par le SIH montrent que 39 511 puits artésiens ont été forés dans la région entre 1900 et 2020. Les profondeurs des puits artésiens vont de quelques mètres à plus de 100 mètres.

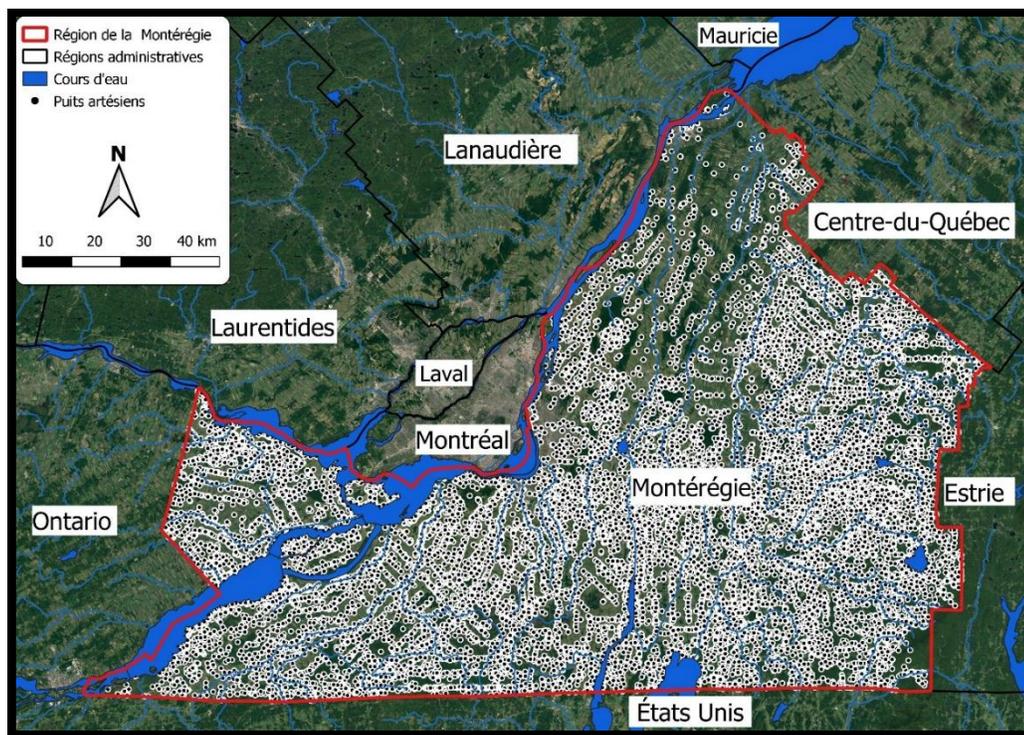


Figure 4.2 Distribution des puits artésiens de la Montérégie (Source : Données Québec)

Comme le montre la Figure 4.3, un nombre important de puits artésiens se trouve à proximité des puits de pétrole et de gaz inactifs. Seuls 18 puits inactifs ne présentaient aucun puits artésien à moins de 1000 m ; 62% des puits inactifs (n=83) avaient entre un et dix puits artésiens dans la même zone de 1000 m. Enfin, pour trois puits inactifs,

nous avons dénombré un nombre élevé de puits artésiens (51, 58 et 60 puits) à des distances différentes inférieures à 1000 m.

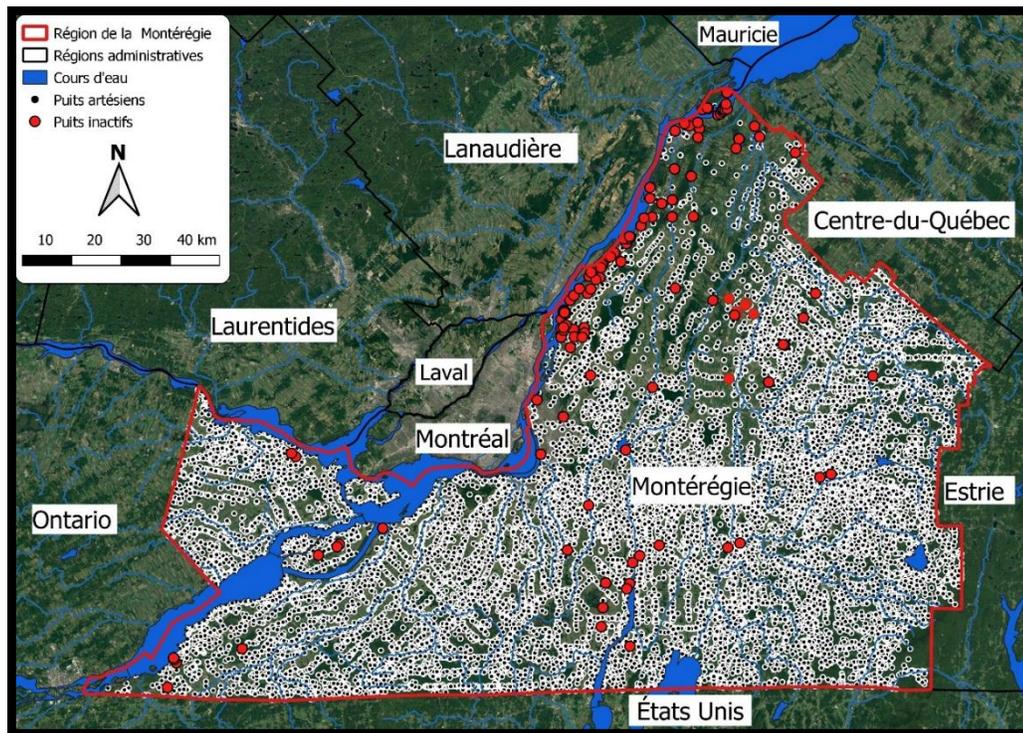


Figure 4.3 Position des puits de pétrole et de gaz inactifs par rapport aux puits artésiens (Sources : Données Québec et Sigpeg)

D'autre part, dans la zone tampon de >0 à 250 m, 64 puits inactifs n'avaient aucun puits artésien, le reste des puits avait entre un et dix puits artésiens. Pour la zone tampon de >250 à 500 m, 68 puits inactifs n'avaient pas de puits artésiens dans cette zone, le reste des puits inactifs avait entre un et 17 puits artésiens. Pour la zone tampon de >500 à 750 m, 58 puits inactifs n'incluaient aucun puits artésien à l'intérieur de cette zone, tandis que le reste des puits inactifs avait entre un et 25 puits artésiens. Enfin, dans la zone tampon de >750 à 1000 m, 50 puits inactifs ne présentaient aucun puits artésien dans cette zone, le reste avait entre un et 29 puits artésiens. Le Tableau 4.4 présente le

nombre de puits artésiens trouvés autour de chaque puits de pétrole ou de gaz inactif en fonction des zones tampons.

Tableau 4.4 Position des puits de pétrole et de gaz inactifs par rapport aux puits artésiens

Nombre de puits artésiens	Zone de 1000 m	Pourcentage (%)	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4
0	18	14 %	64	68	58	50
1-10	83	62 %	69	62	70	79
11-20	24	18 %	0	3	2	2
21-30	3	2,25 %	0	0	3	2
31-40	2	1,5 %	0	0	0	0
41-50	0	0	0	0	0	0
51 et plus	3	2,25 %	0	0	0	0

Zone 1 : >0 à 250 m, **Zone 2** : >250 à 500 m, **Zone 3** : >500 à 750 m, **Zone 4** : >750 à 1000 m

4.1.3.2 Eau de surface

La Figure 4.4 illustre les eaux de surface de la Montérégie. D'une part, le fleuve Saint-Laurent et la rivière des Outaouais constituent la frontière nord de la région. D'autre part, la rivière Richelieu traverse la Montérégie du sud au nord avec le plus grand bassin versant en termes de superficie. La région a également deux autres principales rivières tributaires du fleuve Saint-Laurent soit, la rivière Yamaska à l'est et la rivière Châteauguay à l'ouest. Enfin, la Montérégie contient également des lacs, notamment les lacs Saint-François, Saint-Louis et Saint-Pierre.

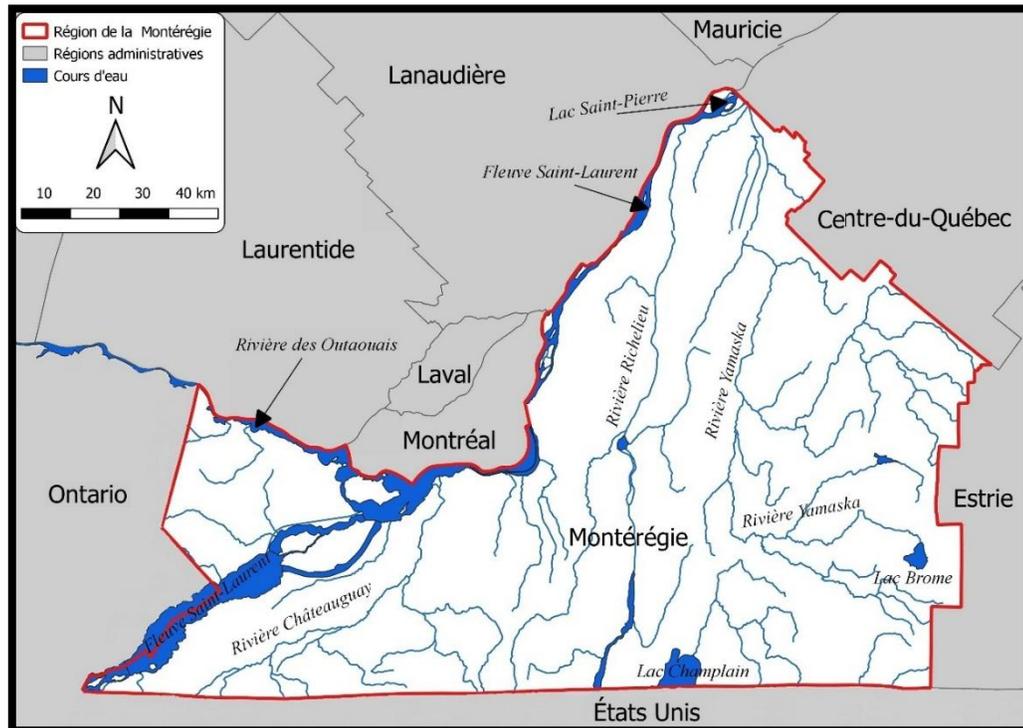


Figure 4.4 Principaux cours d'eau de la Montérégie (Source : Données Québec)

Puits inactifs à proximité du fleuve Saint-Laurent

La Figure 4.5 montre la localisation des puits inactifs par rapport aux cours d'eau de la Montérégie. À partir de cette carte, nous avons dénombré 72 puits situés à plus de 1000 m du fleuve Saint-Laurent. En revanche, sur les 61 puits inactifs qui restent, 56 d'entre eux sont situés à des distances allant de 0 à 1000 m, tandis que cinq puits ont été forés au milieu du fleuve Saint-Laurent. Les résultats sont présentés au Tableau 4.5.

Tableau 4.5 Position des puits de pétrole et de gaz inactifs par rapport au fleuve Saint-Laurent

	Zone de 1000 m	Pourcentage	Au milieu du fleuve	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4
Nombre de puits inactifs	61	46%	5	21	25	5	5

Zone 1 : >0 à 250 m, **Zone 2** : >250 à 500 m, **Zone 3** : >500 à 750 m, **Zone 4** : >750 à 1000 m

Finalement, les observations ont révélé que, sur les 61 puits inactifs situés à moins de 1000 m du fleuve Saint-Laurent, 70% (n=43) ont été forés entre 1960 et 1969 ce qui correspond à la période de l'évolution des techniques d'exploration et d'exploitation des hydrocarbures, notamment en ce qui concerne les plateformes pétrolières offshore.

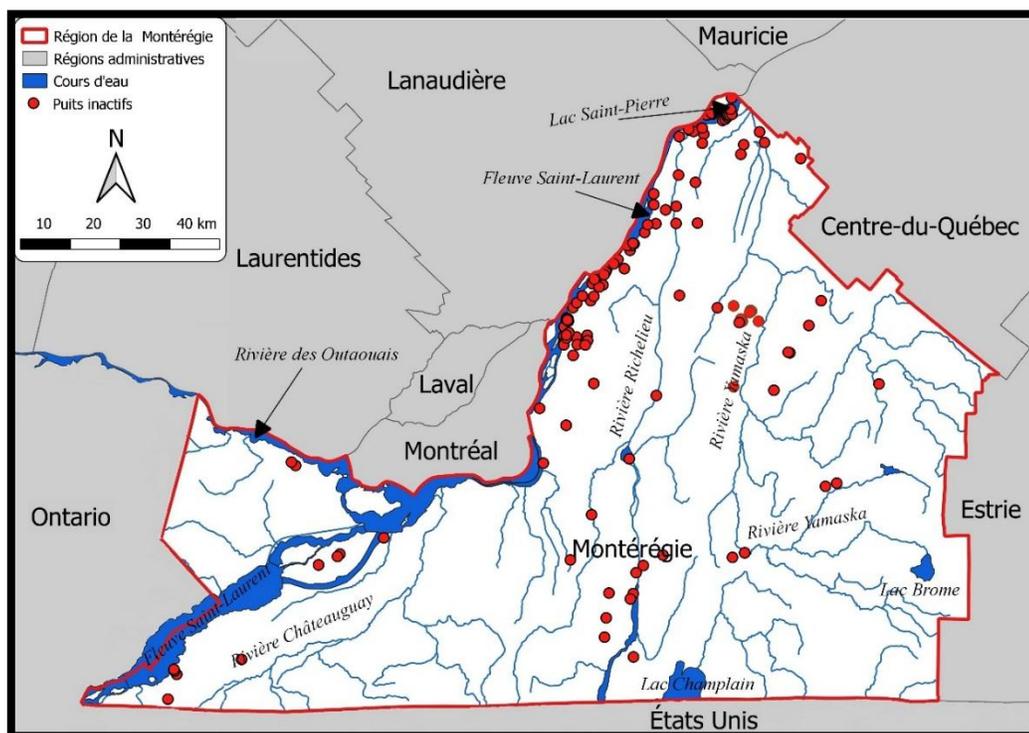


Figure 4.5 Position des puits de pétrole et de gaz inactifs par rapport aux cours d'eau de la Montérégie (Sources : Données Québec et Sigpeg)

Puits à proximité des autres cours d'eau

La Figure 4.5 montre également la position des puits inactifs par rapport aux autres cours d'eau de la Montérégie. La carte montre que 110 puits inactifs n'avaient aucun cours d'eau dans une zone tampon de 1000 m, le reste des puits avaient un seul cours d'eau à des distances différentes, mais inférieures à 1000 m, à l'exception de deux puits inactifs (B062 et A104) où nous avons signalé deux cours d'eau à moins de 1000 m. Les résultats sont présentés dans le Tableau 4.6.

Tableau 4.6 Position des puits de pétrole et de gaz inactifs par rapport aux cours d'eau

Nombre de cours d'eau	Zone de 1000 m	Pourcentage	Zone1	Zone 2	Zone 3	Zone 4
0	110	83%	123	127	127	130
1	21	16%	10	6	6	3
2	2	1%	0	0	0	0

Zone 1 : >0 à 250 m, **Zone 2** : >250 à 500 m, **Zone 3** : >500 à 750 m, **Zone 4** : >750 à 1000 m

Sur les 23 puits inactifs, nous avons dénombré dix puits à moins de 250 m des cours d'eau, 12 puits inactifs incluaient des cours d'eau à des distances variant de 250 à 750 m et seulement trois puits inactifs avaient présenté des cours d'eau dans la zone tampon de >750 à 1000 m. Enfin, nous avons remarqué la présence de huit puits à proximité des rivières Richelieu et Yamaska avec des distances allant de 250 à 1000 mètres (cinq puits ont été proches de la rivière Richelieu et trois puits ont été proches de la rivière Yamaska).

4.1.3.3 Zones agricoles

La Figure 4.6 montre la répartition des zones agricoles dans la région. Nous remarquons que les zones agricoles couvrent une grande partie de la superficie totale de la région, confirmation de la vocation agricole de la Montérégie.

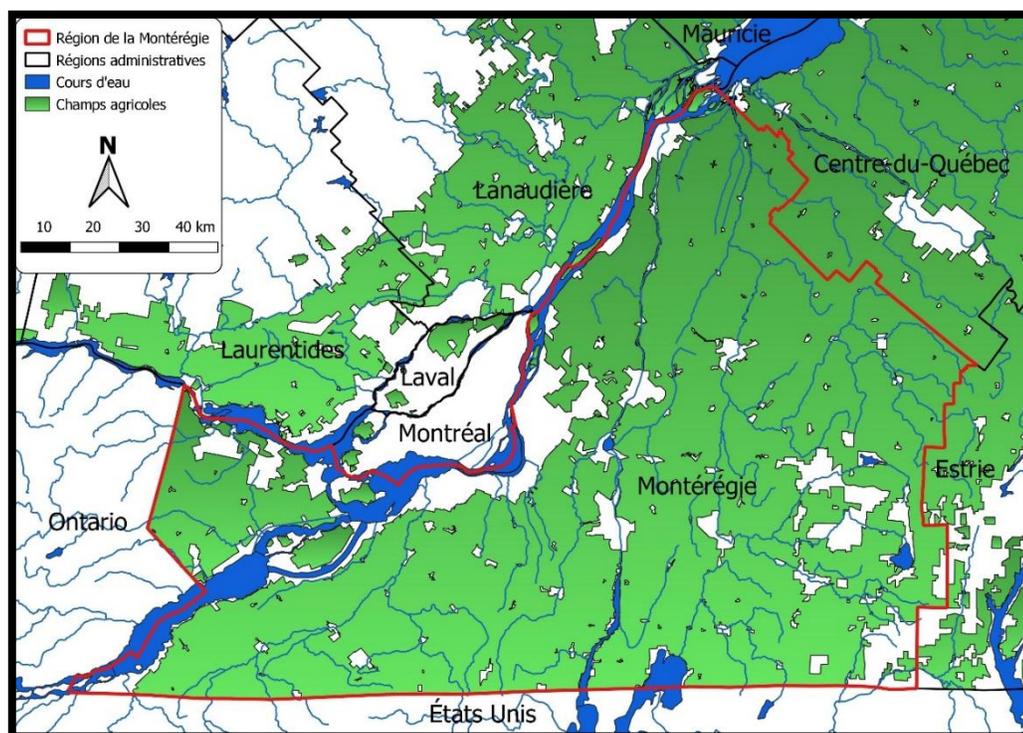


Figure 4.6 La répartition des zones agricoles de la Montérégie (Source : Données Québec)

La Figure 4.7 indique la position des puits inactifs par rapport aux zones agricoles de la région. D'après l'analyse de la carte, nous avons constaté que 112 puits inactifs se trouvaient à une distance de moins de 1000 m des zones agricoles. Sur les 112 puits inactifs, 82 ont été forés à l'intérieur d'une zone agricole. Par ailleurs, nous avons remarqué qu'il y avait parfois plus d'un puits inactif foré dans un même champ agricole. De plus, 72 des puits inactifs se trouvant au milieu des zones agricoles ont été forés avant 1967. Les résultats sont présentés au Tableau 4.7.

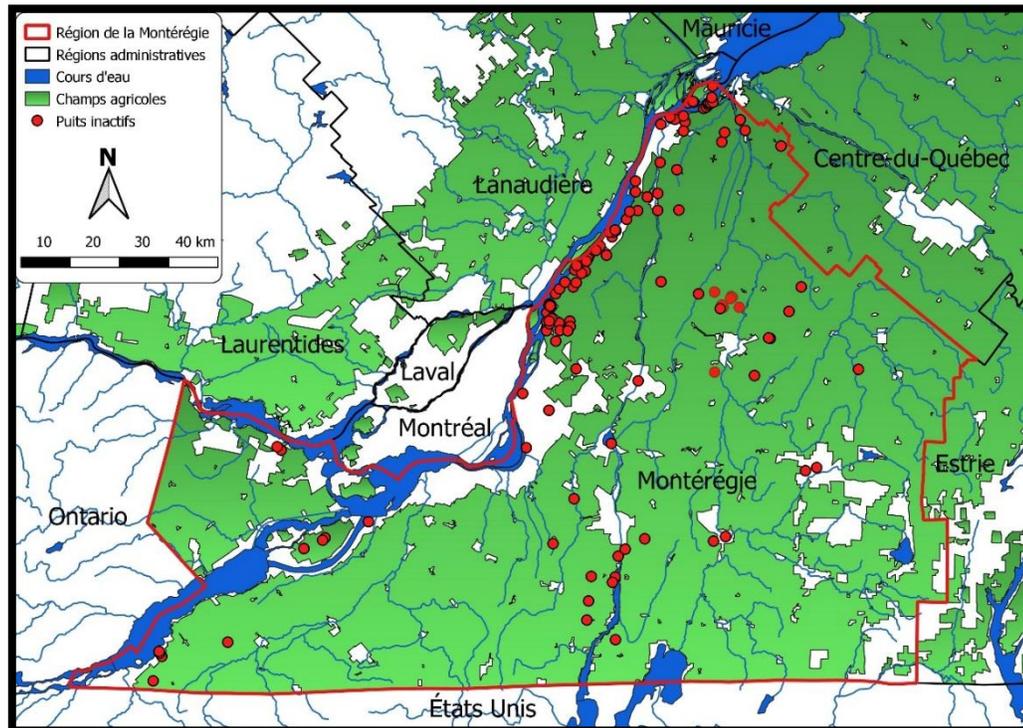


Figure 4.7 Position des puits de pétrole et de gaz inactifs par rapport aux zones agricoles de la Montérégie (Sources : Données Québec et Sigpeg)

Tableau 4.7 Positon des puits de pétrole et de gaz inactifs par rapport aux zones agricoles.

	Zone de 1000 m	Au milieu d'un champ	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4
Nombre de puits inactifs	112	82	10	4	5	11

Zone 1 : >0 à 250 m, **Zone 2** : >250 à 500 m, **Zone 3** : >500 à 750 m, **Zone 4** : >750 à 1000 m

4.1.4 Cartographie de l'environnement bâti

4.1.4.1 Réseau ferroviaire

La Figure 4.8 montre le tracé des voies ferrées traversant la région. Ces chemins de fer ont permis de relier les différentes zones de la région entre elles, en plus de mettre la Montérégie en connexion avec l'extérieur.

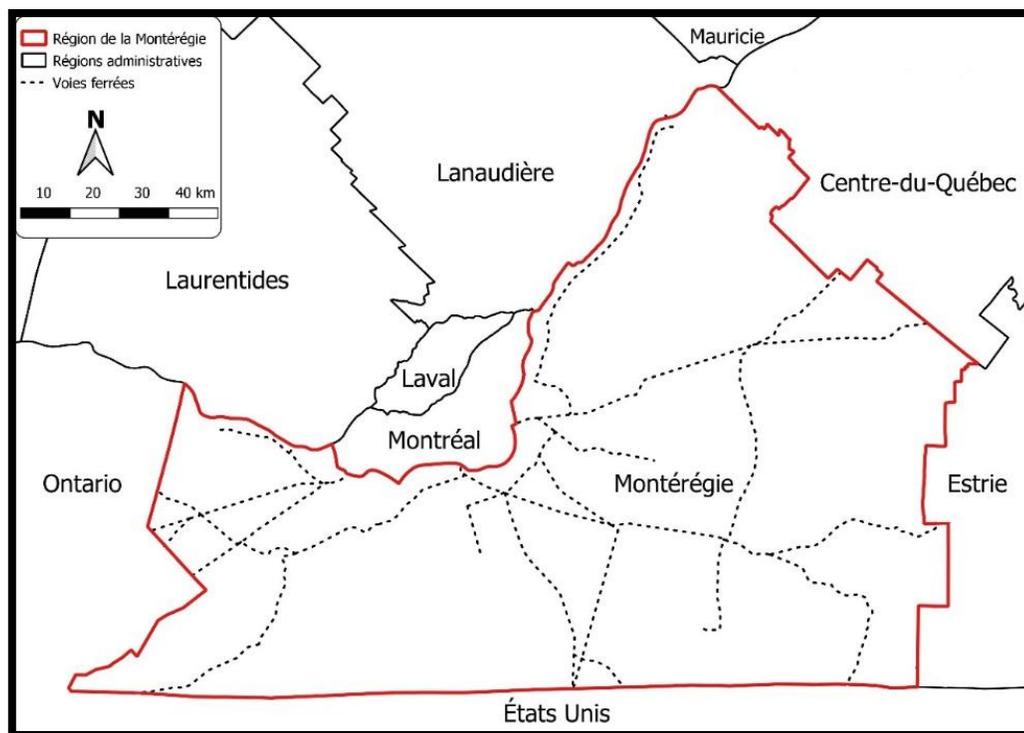


Figure 4.8 Réseau ferroviaire de la Montérégie (Source : Données Québec)

À partir de la Figure 4.9, nous avons remarqué qu'un nombre important de puits inactifs se trouve à proximité des chemins de fer, notamment les puits forés au bord du fleuve Saint-Laurent. L'analyse cartographique a montré que 49 puits inactifs ont une voie ferrée passant à moins de 1000 m de leur emplacement; les détails par zones sont présentés au Tableau 4.8. Cette carte montre également que le puits AZ43 est le seul

qui présentait trois voies passant à moins de 1000 m de sa localisation. Les données des puits ont révélé que 34 de ces puits ont été forés entre 1949 et 1963.

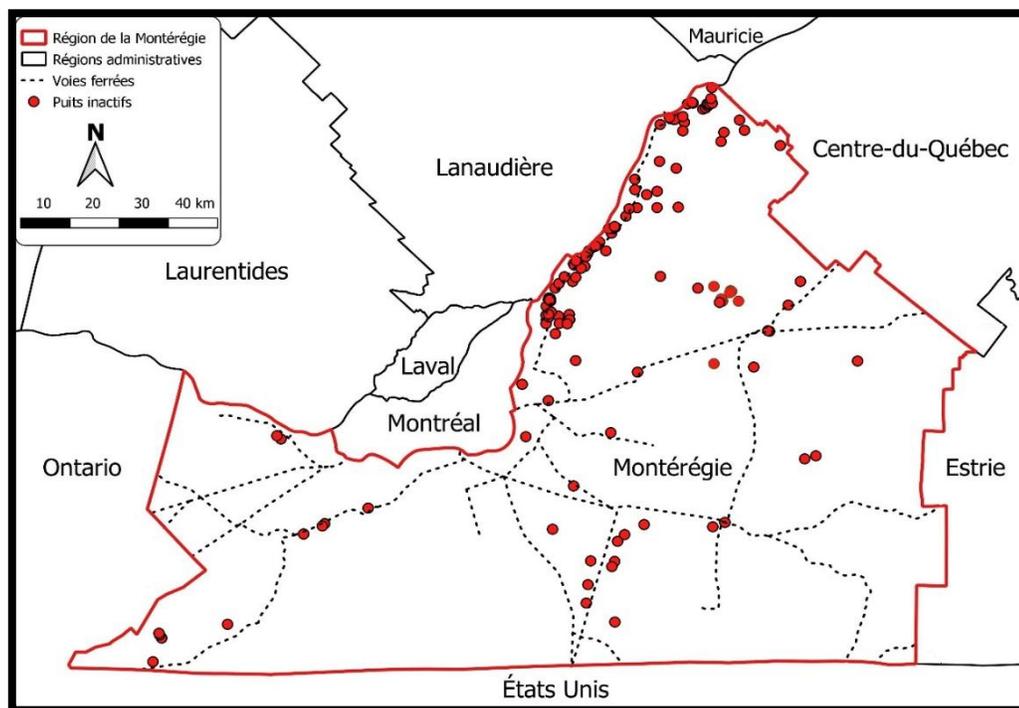


Figure 4.9 Position des puits de pétrole et de gaz inactifs par rapport aux chemins de fer de la Montérégie (Sources : Données Québec et Sigpeg)

Tableau 4.8 Position des puits de pétrole et de gaz inactifs par rapport aux chemins de fer

Nombre de voies	Zone de 1000 m	Pourcentage	Zone1	Zone2	Zone3	Zone4
0	83	62 %	124	119	113	125
1	49	37 %	8	14	20	8
2	0	0	1	0	0	0
3	1	1 %	0	0	0	0

Zone 1 : >0 à 250 m, **Zone 2** : >250 à 500 m, **Zone 3** : >500 à 750 m, **Zone 4** : >750 à 1000 m

4.1.4.2 Établissements scolaires

Les données ministérielles ont confirmé la présence de 972 établissements scolaires dans la région de la Montérégie. Le choix des niveaux d'enseignement préscolaire, primaire et secondaire nous a conduits à éliminer un nombre important d'établissements. Nous dénombrons donc 571 écoles de ces trois niveaux. Les détails de ces établissements sont présentés au Tableau 4.9.

Tableau 4.9 Les établissements scolaires de la Montérégie selon les niveaux d'enseignement (Source : Données Québec)

Niveau scolaire	Préscolaire	Primaire	Secondaire	Préscolaire-Primaire	Primaire-Secondaire	Préscolaire-Primaire-Secondaire	Secondaire-Éducation aux adultes
Nombre d'écoles	8	37	105	388	11	15	7

La Figure 4.9 montre la position des puits inactifs par rapport aux établissements d'enseignement préscolaires, primaires et secondaires. L'analyse cartographique a révélé que 108 puits inactifs se trouvaient à une distance de plus de 1000 m de ces établissements scolaires. Les autres puits inactifs incluaient entre un et quatre établissements dans une zone tampon de 1000 m, à l'exception du puits AZ057 qui comptait six établissements dans cette zone. Les résultats basés sur les zones tampons n'apportent pas de détails importants. L'ensemble de ces puits avait entre une et quatre écoles par zone tampon. Les détails sont présentés au Tableau 4.10.

Une analyse des données selon l'année de forage a montré que l'ensemble des puits inactifs qui avaient une ou plusieurs écoles à moins de 1000 m avaient été forés avant 1963, à l'exception du puits A157 qui avait été foré en 1971.

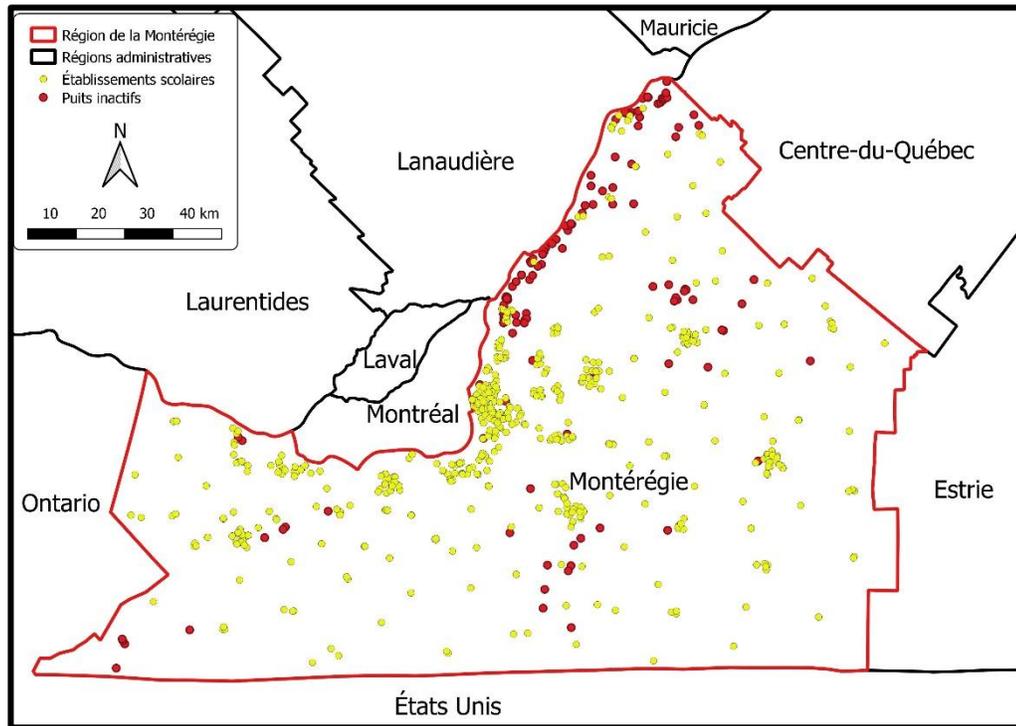


Figure 4.10 Position des puits de pétrole et de gaz inactifs par rapport aux établissements d'enseignement préscolaires, primaires et secondaires de la Montérégie (Sources : Données Québec et Sigpeg)

Tableau 4.10 Position des puits de pétrole et de gaz inactifs par rapport aux établissements d'enseignement préscolaires, primaires et secondaires

Nombre d'établissements	Zone de 1000 m	Pourcentage	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4
0	108	81 %	129	124	119	120
1	12	9 %	4	6	11	8
2	3	2 %	0	2	3	2
3	4	3 %	0	1	0	2
4	5	4 %	0	0	0	1
5	0	0	0	0	0	0
6	1	1 %	0	0	0	0

Zone 1 : 0 > à 250 m, **Zone 2** : 250 > à 500 m, **Zone 3** : 500 > à 750 m, **Zone 4** : 750 > à 1000 m

4.1.4.3 Hôpitaux

Les travaux de cartographie ont mené à la création d'une carte synthétisant la distribution des hôpitaux et de leurs annexes dans la région de la Montérégie. La carte illustrée dans la Figure 4.11 montre qu'il existe 17 installations (hôpitaux et annexes) appartenant au MSSS distribuées sur le territoire de la région. Sur les 17 installations, nous dénombrons 11 hôpitaux (incluant un centre hospitalier pour les communautés autochtones) et six annexes (quatre appartenant à l'hôpital Charles-Le Moyne et deux appartenant à l'hôpital du Haut-Richelieu).

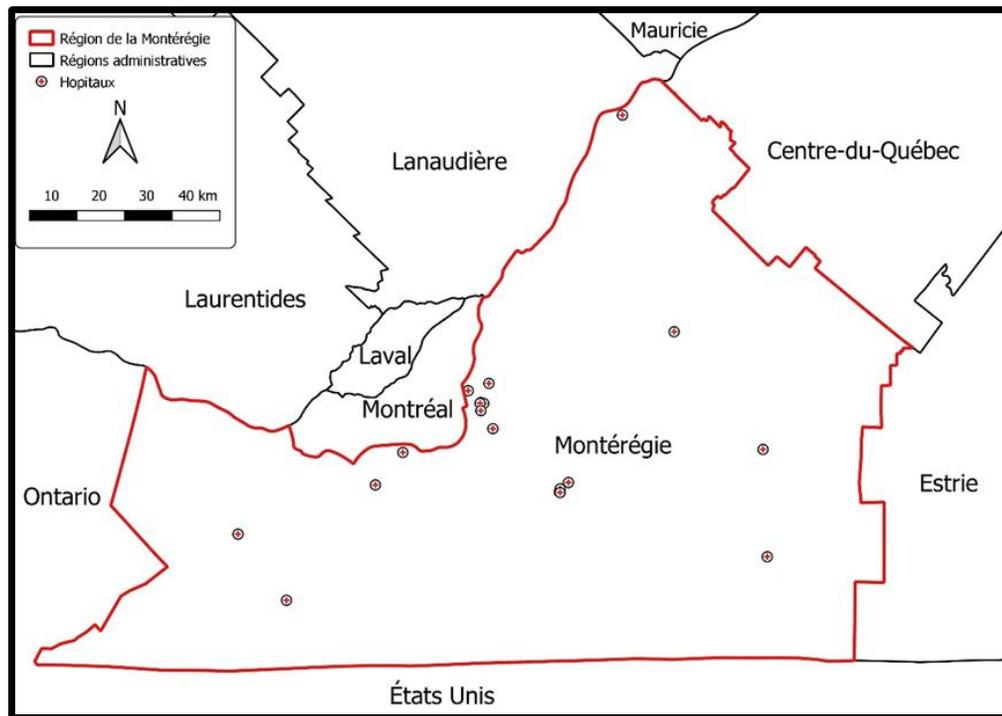


Figure 4.11 Localisation des hôpitaux de la Montérégie (Source : Données Québec)

La Figure 4.12 montre l'emplacement des puits inactifs par rapport aux hôpitaux et à leurs annexes situés dans la région de la Montérégie. L'analyse de la carte a révélé que l'ensemble des installations se trouve très loin des puits inactifs, à l'exception de l'hôpital Hôtel-Dieu de la ville de Sorel-Tracy qui se situe à proximité de trois puits inactifs soit A025, A026 et A027 à des distances inférieures à 1000 m. Les détails des distances sont présentés au Tableau 4.11.

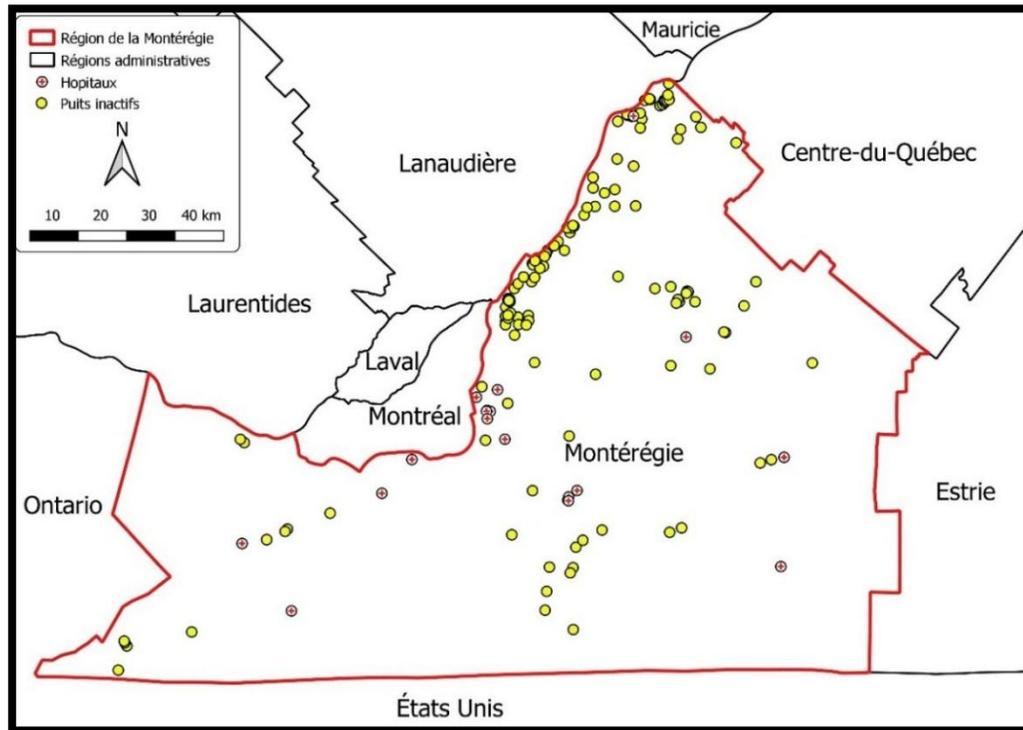


Figure 4.12 Localisation des puits de pétrole et de gaz inactifs par rapport aux hôpitaux de la Montérégie (Source : Données Québec)

Tableau 4. 11 Position des puits de pétrole et de gaz inactifs par rapport aux hôpitaux

Nombre d'établissements	Zone de 1000 m	Pourcentage	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4
0	130	98 %	133	131	132	133
1	3	2 %	0	2	1	0

Zone 1 : 0> à 250 m, **Zone 2** : 250> à 500 m, **Zone 3** : 500> à 750 m, **Zone 4** : 750> à 1000 m

4.1.5 Cartographie de l'environnement humain

4.1.5.1 Densité de la population

La Figure 4.13 montre la répartition de la population montérégienne de toutes les catégories d'âge sur le territoire de la région. À partir de cette carte, nous avons dénombré 2 445 aires de diffusion (AD).

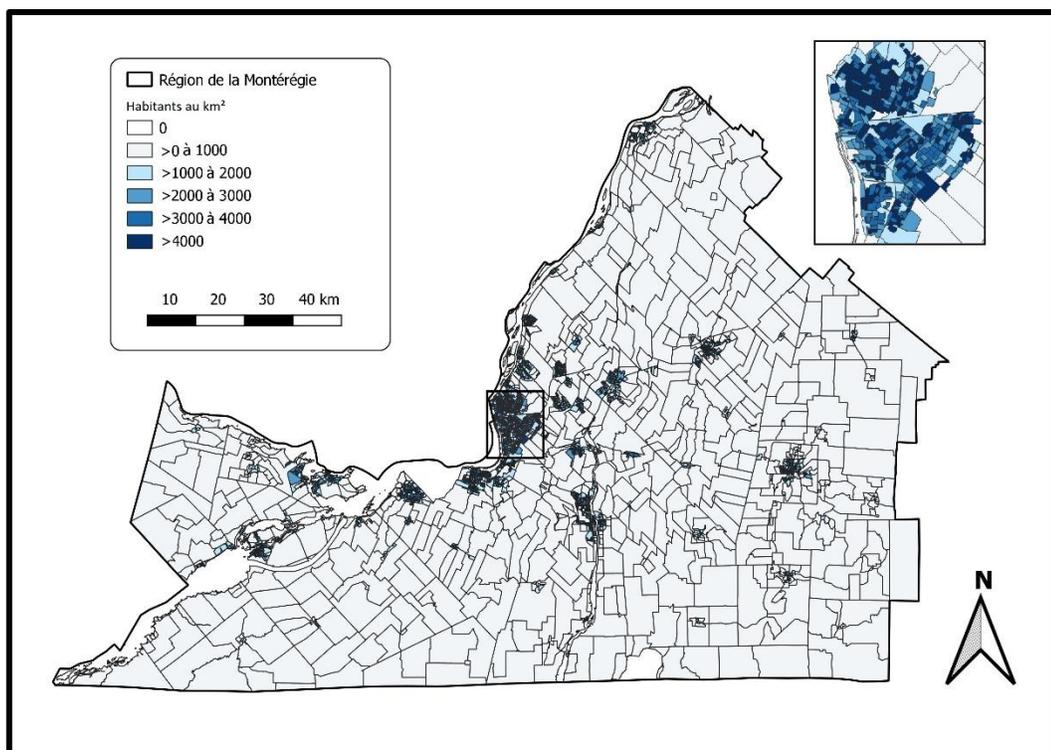


Figure 4.13 Répartition de la population montérégienne sur le territoire de la Montérégie (Sources : Statistique Canada et Données Québec)

En 2016, la Montérégie comptait environ 1,5 million de personnes, avec une densité qui variait entre zéro et 20 788 personnes par km² par AD; la densité médiane était de 2 357 personnes par km². Les résultats montrent que 746 des AD de la Montérégie avaient une densité comprise entre 0 et 1000 personnes par km². Cependant, ce nombre d'AD représente environ 91% de la superficie totale de la Montérégie. Le reste des AD

avaient des densités variant de 1000 à plus de 4000 personnes par km². Enfin, nous remarquons la présence de 30 AD qui avaient enregistré une densité nulle. Les détails des résultats sont présentés au Tableau 4.12.

Tableau 4.12 Répartition de la population montréalaise en fonction des aires de diffusion (Source : Statistique Canada)

Classe de densité	Nombre d'AD	Pourcentage
0	30	1 %
>0 - 1000	746	31 %
>1000 - 2000	290	12 %
>2000 - 3000	470	19 %
>3000 - 4000	437	18 %
>4000	472	19 %

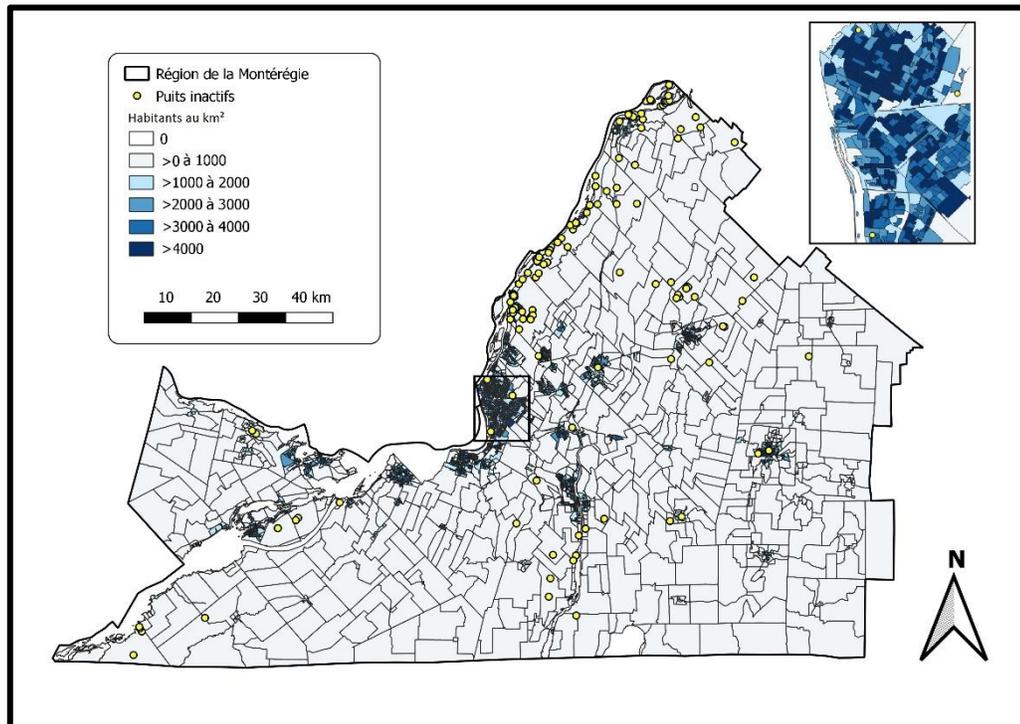


Figure 4.14 Position des puits de pétrole et de gaz inactifs en fonction de la densité de la population en Montérégie (Sources : Statistique Canada, Données Québec et Sigpeg)

Quant à l'emplacement des puits inactifs, la Figure 4.14 montre que 113 puits inactifs avaient été forés dans des AD où la densité était comprise entre zéro et 1000 personnes par km². Le reste des puits se situaient dans des AD ayant une densité variant de 1000 à plus de 4000 personnes par km² ; les détails sont présentés au Tableau 4.13. Enfin, comme mentionné précédemment, cinq puits inactifs ont été forés au milieu du fleuve Saint-Laurent, donc en zone inhabitée.

Tableau 4.13 Position des puits de pétrole et de gaz inactifs par rapport à la répartition de la population en Montérégie

Classe de densité	Nombre de puits	Pourcentage (%)
0	0	0
>0 - 1000	113	85 %
>1000 - 2000	5	3,75 %
>2000 - 3000	5	3,75 %
>3000 - 4000	4	3 %
>4000	1	0,75 %
Au milieu du fleuve Saint-Laurent	5	3,75 %

Enfin, en analysant les caractéristiques des puits inactifs forés dans des zones densément peuplées (>1000 hab./km²), nous avons constaté que ces puits avaient été forés avant 1963 à l'exception du puits A157 foré en 1971.

4.1.5.2 Densité des enfants de moins de 5 ans

La Figure 4.15 montre la répartition des enfants âgés de moins de 5 ans sur l'ensemble des 2 445 AD de la Montérégie en fonction des classes de densité précédentes. La densité maximale par km² par AD était de 1 230 enfants, tandis que nous avons signalé une densité nulle dans d'autres AD et une densité médiane de 101 enfants par km² par AD.

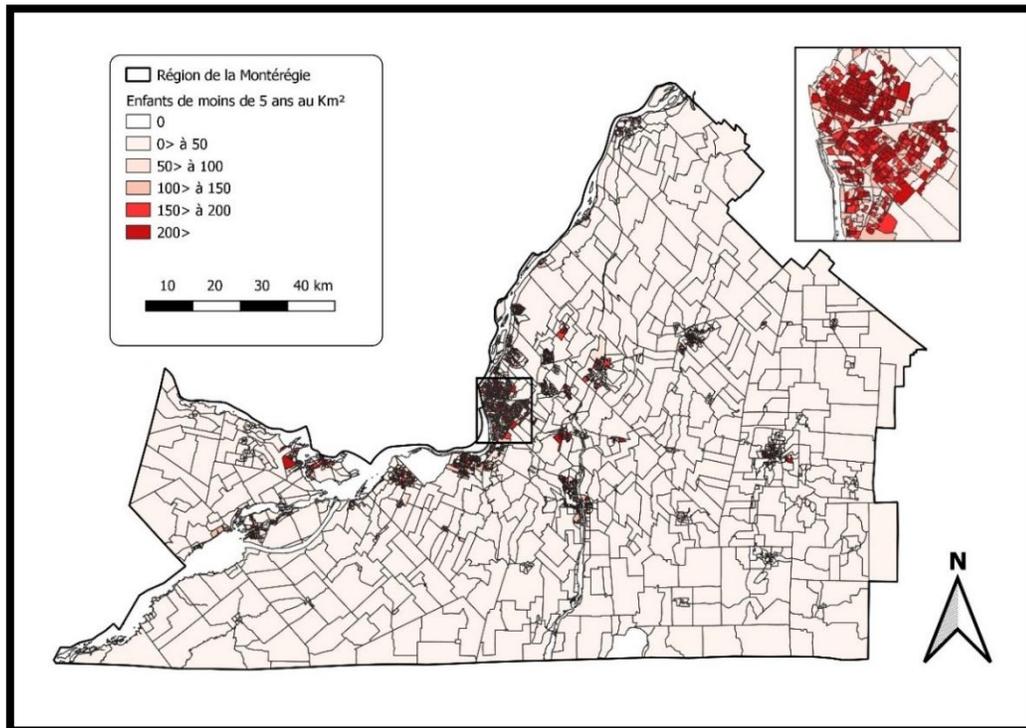


Figure 4.15 Répartition des enfants de moins de 5 ans de la Montérégie (Sources : Statistique Canada et Données Québec)

D'après la carte de la répartition des enfants de moins de 5 ans, nous remarquons que 806 AD avaient une densité comprise entre zéro et 50 enfants par km². Cependant, ce nombre d'AD représente environ 91% de la superficie totale de la Montérégie. En revanche, le reste des AD avait une densité qui variait entre 50 et plus de 200 enfants par km². Enfin, nous notons que 42 AD avaient une densité nulle. Les résultats sont présentés au Tableau 4.14.

Tableau 4.14 Répartition des enfants de moins de 5 ans sur le territoire de la Montérégie en fonction des aires de diffusion (Source : Statistique Canada)

Classe de densité	Nombre d'AD	Pourcentage
0	42	1,72 %
>0- 50	806	32,97 %
>50 - 100	368	15,05 %
>100 - 150	388	15,87 %
>150 - 200	333	13,62 %
>200	508	20,78 %

La Figure 4.16 montre la localisation des puits inactifs sur le territoire de la Montérégie en fonction de la densité des enfants de moins de 5 ans. La variation de la distribution des enfants sur le territoire de la région de la Montérégie a conduit à une répartition des puits inactifs sur des AD de densités différentes, de sorte que nous avons enregistré la présence d'au moins un puits dans chacune des six classes de densité. Cependant, nous remarquons que 113 puits inactifs se situaient dans des AD ayant une densité comprise entre zéro et 50 enfants par km². Le reste des puits se trouvaient dans des AD ayant une densité qui variait entre 50 et plus de 200 enfants par km². Enfin, comme mentionné auparavant, cinq puits inactifs ont été forés au milieu du fleuve Saint-Laurent, donc en zone inhabitée. Les résultats sont présentés au Tableau 4.15.

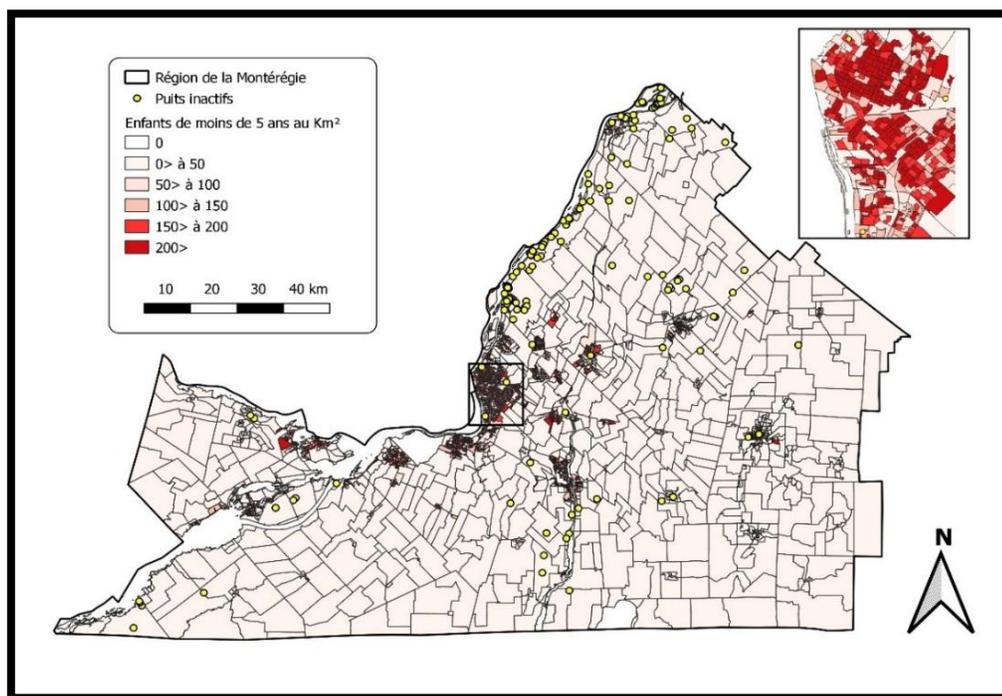


Figure 4.16 Position des puits de pétrole et de gaz inactifs en fonction de la densité des enfants de moins de 5 ans en Montérégie (Sources : Statistique Canada, Données Québec et Sigpeg)

Tableau 4.15 Position des puits de pétrole et de gaz inactifs par rapport à la répartition des enfants de moins de 5 ans en Montérégie

Classe de densité	Nombre de puits	Pourcentage
0	0	0
>0 - 50	113	84,96 %
>50> - 100	6	4,51 %
>100 - 150	4	3,01 %
>150 - 200	4	3,01 %
>200	1	0,75 %
Au milieu du fleuve Saint-Laurent	5	3,76 %

Statistiquement, à partir de ces résultats, nous constatons qu'il y a des liens avec ce qui était trouvé pour la densité de population de toutes les catégories d'âges, de sorte que nous observons que sur les 113 puits inactifs se trouvant dans des zones ayant une densité comprise entre 0 et 50 enfants par km², 110 puits sont les mêmes qui ont été trouvés dans des AD avec des densités au km² allant de 0 à 1 000 habitants de toutes les catégories d'âge. Par ailleurs, les puits forés dans des AD avec une densité supérieure à 50 enfants par km², avaient tous été forés avant 1963 à l'exception du puits A157 qui avait été foré en 1971.

4.2 Résultats des analyses de données multivariées

4.2.1 Analyse en composantes principales (ACP)

Premièrement, les résultats de la mesure de l'adéquation de l'échantillonnage ont révélé un indice KMO de 0,641, ce qui signifie que la validité de la matrice de données est faible, mais que l'ACP est réalisable (Stafford et Bodson, 2006). De même, le résultat du test de sphéricité de Bartlett était significatif ($p < 0,0001$). Dans ce cas, au moins l'une des corrélations entre les variables est significativement différente de zéro. Par conséquent, on pouvait poursuivre l'analyse. Les résultats des deux tests sont présentés au Tableau 4.16.

Tableau 4.16 Résultats du test KMO et test de Bartlett

Indice KMO et test de Bartlett		
Indice de Kaiser-Meyer-Olkin pour la mesure de la qualité d'échantillonnage.		0,641
Test de sphéricité de Bartlett	Khi ² (Valeur observée)	1802,688
	Khi ² (Valeur critique)	424,334
	ddl	378
	p-value	<0,0001
	Alpha	0.05

Nous avons ensuite procédé au choix des facteurs (composantes) à extraire à partir du tableau de la variance totale expliquée (Tableau 4.17). Nous avons remarqué que les dix premières composantes avaient une valeur propre supérieure à 1. Par ailleurs, la Figure 4.17 montrant le graphique des valeurs propres, indique une rupture après le quatrième facteur. Nous avons décidé donc de garder seulement les quatre premiers facteurs.

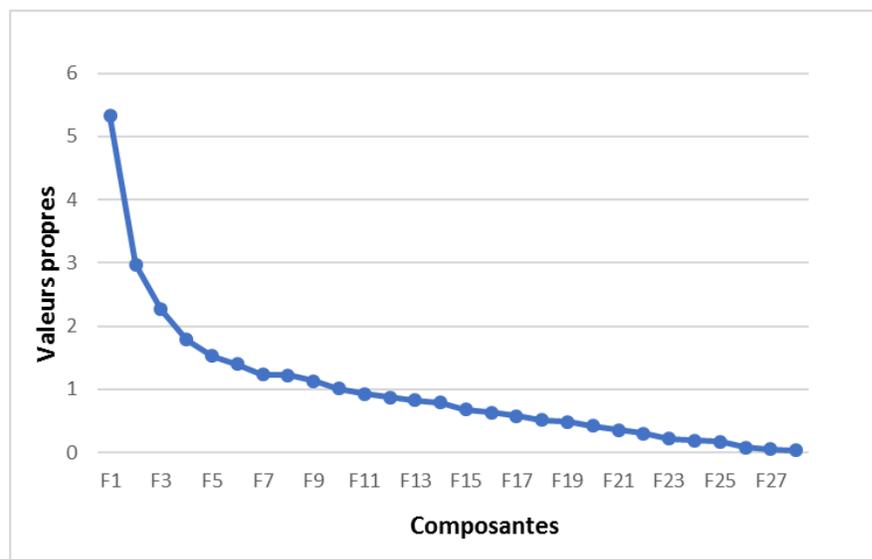


Figure 4.17 Graphique des valeurs propres

Tableau 4.17 La variance totale expliquée

Composante	Valeurs propres initiales		
	Valeur propre	% Variabilité	% cumulé
F1	5,322	19,006	19,006
F2	2,970	10,606	29,612
F3	2,265	8,090	37,702
F4	1,784	6,373	44,075
F5	1,530	5,466	49,541
F6	1,396	4,986	54,527
F7	1,229	4,388	58,915
F8	1,222	4,364	63,279
F9	1,135	4,054	67,333
F10	1,008	3,600	70,933

Avant de commencer l'interprétation des résultats de l'ACP et comme nous avons codifié les variables, nous présentons dans le Tableau 4.18 les variables avec les codes associés afin de bien situer le lecteur et éviter toute forme de confusion.

Tableau 4.18 Liste des codes associés aux variables utilisées pour l'ACP

Variable	Code
Puits artésiens dans la zone tampon de >0 à 250m	PA1
Puits artésiens dans la zone tampon de >250 à 500m	PA2
Puits artésiens dans la zone tampon de >500 à 750m	PA3
Puits artésiens dans la zone tampon de >750 à 1000m	PA4
Cours d'eau dans la zone tampon de >0 à 250m	CE1
Cours d'eau dans la zone tampon de >250 à 500m	CE2
Cours d'eau dans la zone tampon de >500 à 750m	CE3
Cours d'eau dans la zone tampon de >750 à 1000m	CE4
Zone agricole dans la zone tampon de >0 à 250m	CA1
Zone agricole dans la zone tampon de >250 à 500m	CA2
Zone agricole dans la zone tampon de >500 à 750m	CA3
Zone agricole dans la zone tampon de >750 à 1000m	CA4
Fleuve Saint-Laurent dans la zone tampon de >0 à 250m	FS1
Fleuve Saint-Laurent dans la zone tampon de >250 à 500m	FS2
Fleuve Saint-Laurent dans la zone tampon de >500 à 750m	FS3
Fleuve Saint-Laurent dans la zone tampon de >750 à 1000m	FS4
Chemins de fer dans la zone tampon de >0 à 250m	RF1
Chemins de fer dans la zone tampon de >250 à 500m	RF2
Chemins de fer dans la zone tampon de >500 à 750m	RF3
Chemins de fer dans la zone tampon de >750 à 1000m	RF4
Écoles dans la zone tampon de >0 à 250m	EC1
Écoles dans la zone tampon de >250 à 500m	EC2
Écoles dans la zone tampon de >500 à 750m	EC3
Écoles dans la zone tampon de >750 à 1000m	EC4
Hôpital dans la zone tampon de >0 à 250m	HO1
Hôpital dans la zone tampon de >250 à 500m	HO2
Hôpital dans la zone tampon de >500 à 750m	HO3
Hôpital dans la zone tampon de >750 à 1000m	HO4
Densité de la population	PT
Densité des enfants de moins de 5ans	ENF
Année de forage	AFO
Année d'abandon	AAB
Profondeur	PRO
Compagnie responsable	COM
Municipalité	MRC

Les résultats des corrélations initiales entre les variables et les facteurs de l'ACP sont présentés au Tableau 4.19.

Tableau 4.19 Corrélations initiales entre les variables et les facteurs

	F1	F2	F3	F4
PT	-0,728	0,176	0,406	0,204
ENF	-0,709	0,207	0,464	0,137
PA1	0,197	0,496	-0,104	0,446
PA2	-0,034	0,737	-0,234	0,112
PA3	-0,151	0,770	-0,281	-0,239
PA4	-0,086	0,756	-0,275	-0,202
FS1	-0,146	-0,101	-0,409	0,583
FS2	-0,225	-0,328	0,058	-0,425
FS3	-0,057	0,140	0,056	0,216
FS4	-0,054	0,134	0,357	-0,063
CE1	0,094	-0,008	0,083	-0,127
CE2	-0,019	0,284	-0,100	-0,382
CE3	-0,023	0,113	-0,264	0,419
CE4	-0,034	0,218	-0,132	-0,193
EC1	-0,401	0,313	0,183	-0,066
EC2	-0,463	0,136	0,321	-0,109
EC3	-0,538	0,285	0,075	-0,194
EC4	-0,438	0,152	0,448	-0,034
HO2	-0,190	0,017	0,223	0,269
HO3	-0,183	-0,006	-0,281	0,064
CA1	0,903	0,195	0,088	-0,018
CA2	0,890	0,238	0,177	-0,077
CA3	0,848	0,253	0,257	-0,029
CA4	0,692	0,215	0,480	-0,017
RF1	-0,434	0,334	-0,212	-0,085
RF2	-0,060	-0,076	0,218	-0,357
RF3	-0,418	-0,316	-0,443	-0,260
RF4	-0,182	0,037	0,405	0,357
AFO	-0,089	-0,074	-0,164	-0,089
AAB	-0,195	-0,141	-0,176	-0,102
PRO	0,172	0,218	-0,081	-0,082

L'analyse de la matrice des corrélations initiales entre les variables et les facteurs (Tableau 4.19) a montré que 12 variables saturent de façon significative sur le facteur F1, tandis qu'entre sept et neuf variables saturent sur les autres facteurs. Cependant, nous avons signalé des ressemblances dans les saturations de certains facteurs, de sorte qu'on trouve des valeurs proches l'une de l'autre pour plusieurs facteurs dans la même variable; par exemple, la variable EC4 avait une corrélation de 0,438 sur le facteur F1, et de 0,448 sur le facteur F3. Ceci rend l'interprétation des résultats difficile et nous risquons de perdre d'autres informations. Nous avons donc procédé à la rotation orthogonale de la matrice dans le but d'obtenir une représentation plus simple des facteurs. Pour ce faire, nous avons utilisé la méthode de rotation Varimax avec la normalisation de Kaiser.

Les résultats ont montré que les dimensions D1 et D2 portent 27,4 % de l'information du jeu de données après la rotation. Mises en commun, les quatre composantes expliquent 44,1 % de la variance totale, ce qui n'est pas très élevé. Les résultats sont présentés au Tableau 4.20. Nous avons donc décidé de nous focaliser sur les axes D1 et D2 pour l'interprétation des résultats.

Tableau 4.20 Pourcentage de la variance après rotation Varimax

	D1	D2	D3	D4
Variabilité (%)	14,640	12,734	9,632	7,070
% cumulé	14,640	27,374	37,006	44,075

Tableau 4.21 Corrélations entre les variables et les facteurs après rotation Varimax

	D1	D2	D3	D4
PT	-0,262	0,832	0,004	0,083
ENF	-0,205	0,858	0,037	0,018
PA1	0,269	0,014	0,228	0,608
PA2	0,101	0,086	0,644	0,424
PA3	-0,008	0,079	0,853	0,134
PA4	0,041	0,044	0,816	0,163
FS1	-0,364	-0,123	-0,180	0,599
FS2	-0,257	0,022	-0,079	-0,518
FS3	0,040	0,150	0,010	0,220
FS4	0,202	0,310	0,023	-0,121
CE1	0,113	-0,025	0,009	-0,136
CE2	0,023	-0,040	0,437	-0,211
CE3	-0,118	-0,068	0,004	0,490
CE4	-0,027	-0,040	0,313	-0,057
EC1	-0,095	0,461	0,272	-0,025
EC2	-0,127	0,540	0,104	-0,169
EC3	-0,270	0,446	0,357	-0,122
EC4	-0,031	0,629	0,039	-0,135
HO2	-0,010	0,325	-0,157	0,167
HO3	-0,295	-0,069	0,085	0,132
CA1	0,799	-0,466	0,033	0,068
CA2	0,853	-0,393	0,065	0,003
CA3	0,871	-0,299	0,034	0,024
CA4	0,864	-0,053	-0,060	-0,054
RF1	-0,332	0,211	0,436	0,084
RF2	0,044	0,110	0,024	-0,412
RF3	-0,676	-0,171	0,053	-0,225
RF4	0,106	0,467	-0,241	0,196
AFO	-0,193	-0,078	0,085	-0,134
PRO	0,156	-0,05	0,238	-0,006
AAB	-0,298	-0,053	0,034	-0,142

Les résultats numériques de cette ACP montrent que la première composante soit D1, qui cumule 14,6 % de la variation totale après la rotation Varimax, oppose CA1, CA2, CA3 et CA4 qui contribuent fortement du côté positif, à RF3, RF1 et FS1 qui corrèlent négativement (Figure 4.18). Nous observons donc que la notion de champ agricole revient souvent et les variables associées saturent très fortement sur cet axe et permettent par conséquent de le définir. En revanche, nous observons que les variables CA1 et CA2 saturent aussi sur le facteur D2, mais ils n'auront pas d'impact sur la qualité des résultats, car l'écart entre les saturations est supérieur à 0,3, contrairement aux variables FS1 et RF1 qui saturent sur les facteurs D4 et D3 respectivement avec des valeurs proches.

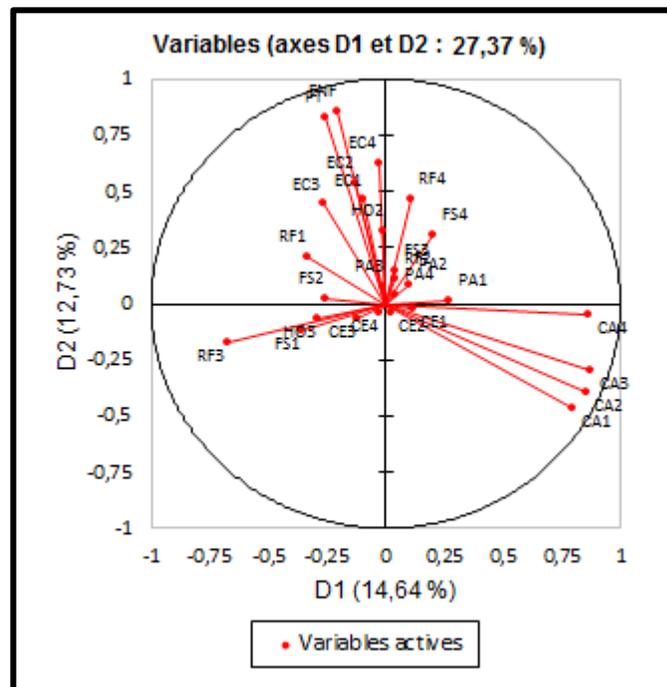


Figure 4.18 Projection des facteurs après rotation Varimax sur les axes D1 et D2

D'autre part, la composante D2 qui explique 12,7 % de la variation totale oppose PT, ENF, FS4, EC1, EC2, EC3, EC4, HO2 et RF4 qui contribuent fortement du côté positif de cet axe contrairement de CA1 et CA2 qui sont corrélées négativement (Figure 4.18). Cependant, nous remarquons que EC3 sature sur le facteur D3, tandis que CA1 et CA2 saturent fortement sur le facteur D1 et permettent de le définir. Ils n'auront par conséquent pas de grand impact sur la définition de l'axe D3.

La composante D3 avec une variabilité de 9,6 % de la variation totale, oppose plus PA2, PA3, PA4, CE2, CE4, EC3 et RF1 qui participent positivement à la définition de cet axe (Figure 4.19). Cependant, nous remarquons que les variables PA2, EC3 et RF1 saturent aussi sur les axes D4, D2 et D1 respectivement et les écarts entre les saturations sont inférieurs à 0,3. Par conséquent, ces variables ne contribuent pas significativement à la définition de cet axe.

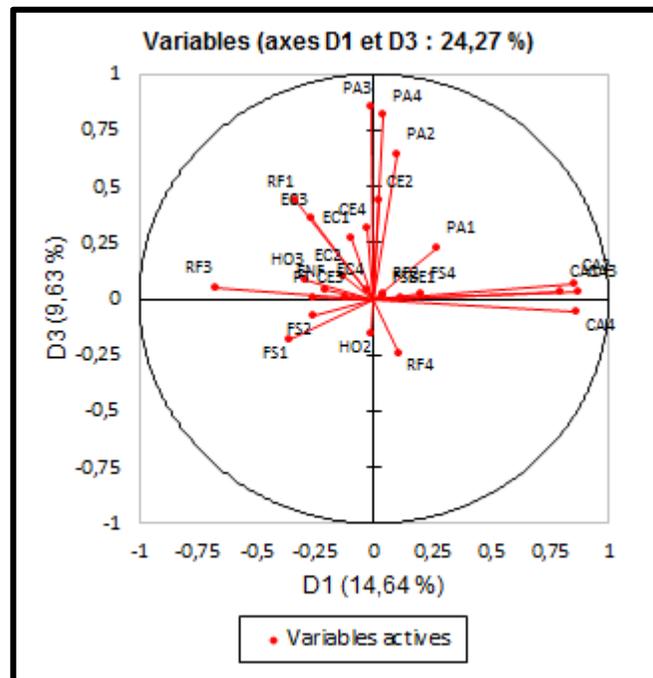


Figure 4.19 Projection des facteurs après rotation Varimax sur les axes D1 et D3

Enfin, la composante D4 qui représente la variabilité la plus basse par rapport aux autres composantes soit de 7,1 %, oppose surtout PA1, PA2, FS1 et CE3 qui expliquent positivement cet axe et FS2 et RF2 du côté négatif (Figure 4.20). Cependant, les variables PA2 et FS1 saturent aussi sur les facteurs D2 et D1 respectivement. Par conséquent, elles ne participent pas significativement à la définition de cet axe.

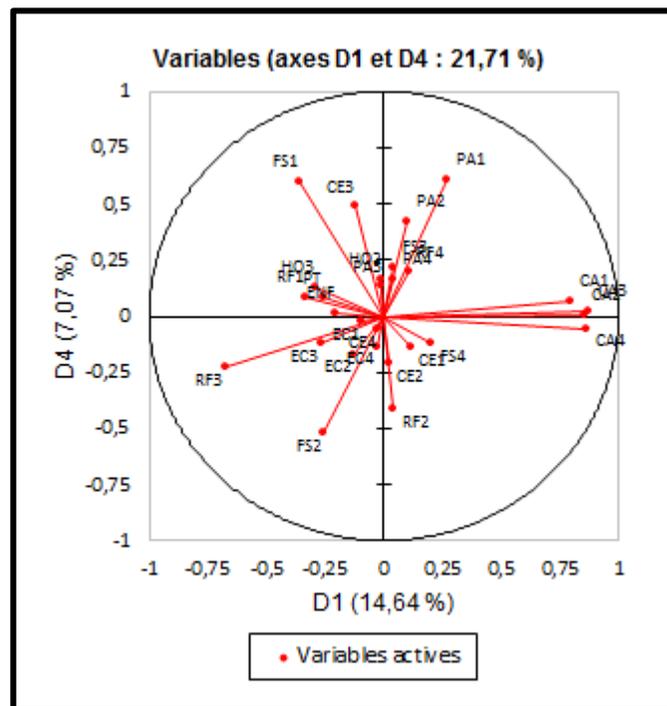


Figure 4.20 Projection des facteurs après rotation Varimax sur les axes D1 et D4

4.2.2 La classification ascendante hiérarchique (CAH)

La classification hiérarchique ascendante nous a permis d'obtenir un nombre important de profils des puits inactifs. Cependant, sur la base du dendrogramme généré (Figure 4.21), nous avons choisi un regroupement en trois classes. Les groupes ont été partagés comme suit :

Classe 1 : Regroupe les puits A056, A157, AZ08, AZ43, AZ57, B026, B027, B096, B110, B114, B123, B124 et B126. Ces puits inactifs se trouvent dans des AD ayant une forte densité de population à l'exception des deux puits B026 et B110 qui sont situés dans des AD de très faible densité. La position étrange de ces deux puits est clairement indiquée dans le graphique des observations de l'ACP (Figure 4.22). Les puits inactifs de cette classe se trouvent généralement loin des cours d'eau, mais proche des établissements scolaires.

Classe 2 : Regroupe les puits A107, A111, A209, A210, A211, A219, AZ09, AZ45, B025, B095, B99, B100, B102, B104, B112 et B133. Les puits inactifs de ce groupe se trouvent généralement proches du fleuve Saint-Laurent, mais loin des cours d'eau, des établissements scolaires et des zones agricoles. De plus, ces puits inactifs se caractérisent par la présence des chemins de fer dans leurs zones tampons de >500 à 750 m. Enfin, ils se trouvent souvent dans des AD ayant une faible densité de population.

Classe 3 : Regroupe le reste des puits inactifs (104 puits) situés dans la région de la Montérégie. Les puits inactifs de ce groupe se trouvent dans des AD ayant une faible densité de population. Ils ont généralement des puits artésiens dans l'une des zones tampons même si ceci est parfois en faible nombre. De plus, ces puits inactifs sont situés loin des cours d'eau et des écoles. Par ailleurs, ces puits inactifs sont à moins de 250 m d'un champ agricole.

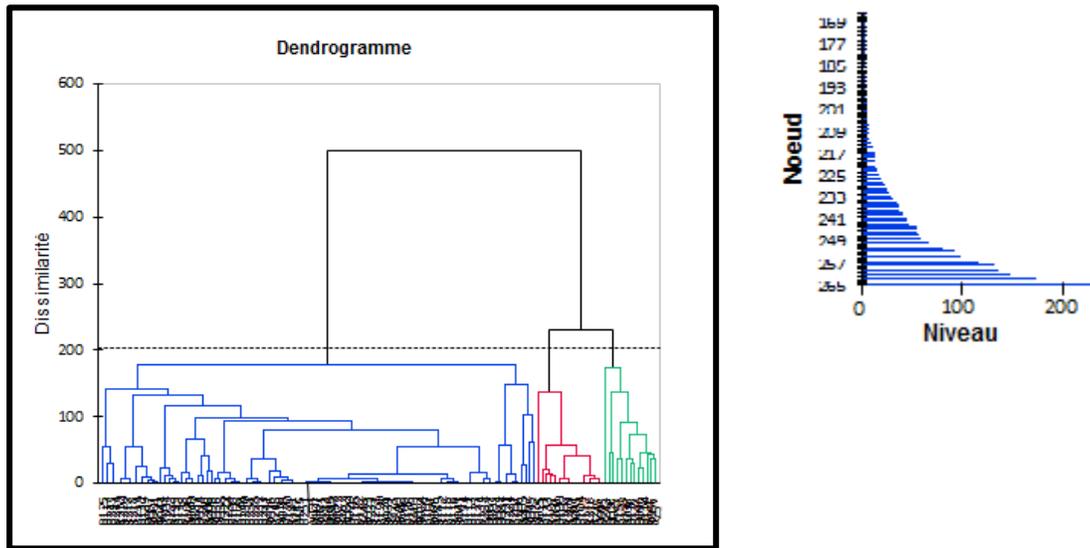


Figure 4.21 Projection des classes de puits inactifs

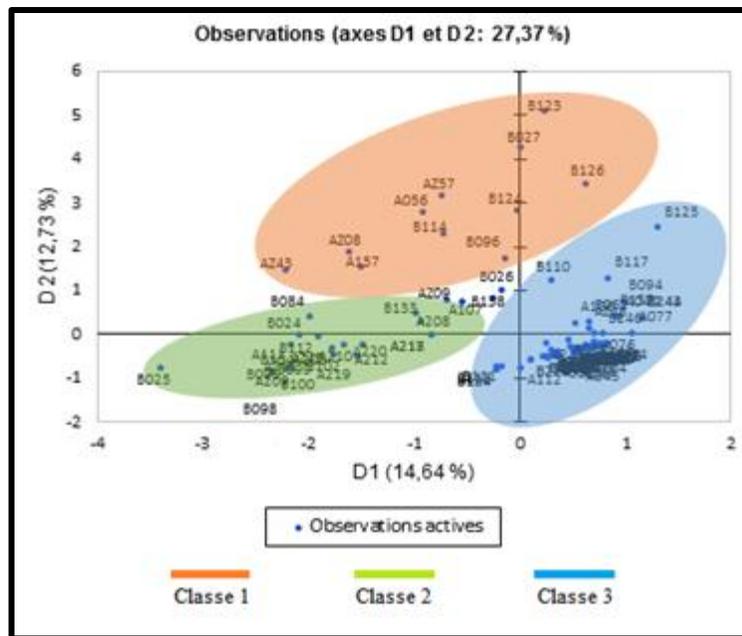


Figure 4.22 Graphique des observations de l'ACP indiquant les classes obtenues par la CAH

CHAPITRE V

DISCUSSION

Nos résultats ont montré que les puits de pétrole et de gaz inactifs constituent un risque pour l'environnement et pour la santé. Dans ce chapitre, nous analysons ces résultats en nous appuyant sur la littérature qui constitue notre problématique et notre cadre théorique. Nous présentons ensuite les forces et les limites de ce mémoire tout en proposant des recommandations pour les futures recherches.

5.1 Données relatives aux puits inactifs

La cartographie spatio-temporelle des forages réalisés dans la région de la Montérégie a montré que les puits de pétrole et de gaz inactifs ont été forés par 40 compagnies pétrolières différentes. Cependant, en regardant de plus près les noms des compagnies, nous constatons que la majorité est constituée de compagnies juniors et que seulement quelques puits avaient été forés par des compagnies connues tels que SOQUIP, Texaco et SNC-Lavalin. Par conséquent, ces compagnies ne disposaient pas de l'équipement, de la technologie et de l'expérience nécessaires pour creuser des puits profonds. De plus, à cette époque, il y avait peu d'information sur le potentiel d'hydrocarbures, ce qui n'avait pas motivé les grandes compagnies pétrolières à investir au Québec.

Les résultats de la cartographie ont également montré que les puits inactifs forés avant 1960 ne sont pas regroupés dans une zone spécifique et que la majorité des puits forés après cette année se trouvent proches du fleuve Saint-Laurent. Au début, les forages

dans la région du Québec ont été effectués à proximité des suintements naturels sans aucune étude géologique approfondie (Laliberté, 2002). Cela explique la distribution aléatoire des puits forés anciennement sur le territoire de la province et en Montérégie plus spécifiquement. Au fil du temps, des études géologiques ont été menées dans plusieurs secteurs de la province, notamment en Gaspésie, ce qui a abouti à la production de certaines cartes géologiques avec peu d'informations sur le potentiel d'hydrocarbures dans la région (Laliberté, 2002). Ces cartes ont ensuite été utilisées par les compagnies pétrolières afin d'identifier les régions susceptibles de contenir des quantités récupérables d'hydrocarbures. En se basant sur ces informations, les prospecteurs avaient foré de nouveaux puits pour vérifier la présence des hydrocarbures dans plusieurs régions dont le long du fleuve Saint-Laurent et en Gaspésie (Laliberté, 2002). Les tentatives des compagnies à cette époque ont conduit à un forage excessif le long du fleuve Saint-Laurent, non seulement dans la région de la Montérégie comme nous l'avons présenté au chapitre des résultats, mais aussi dans les régions traversées par le fleuve comme illustré dans la carte interactive des hydrocarbures du ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN).

La durée de vie des puits inactifs en Montérégie était généralement courte, car ces puits ne contenaient pas de quantités d'hydrocarbures commercialisables pour les raisons citées précédemment. Les entreprises avaient donc fermé les puits juste après la fin des travaux de forage. D'autre part, certains puits ont été fermés des années plus tard, mais cela ne confirme pas que ces puits étaient en service durant cette période, étant donné que peu d'informations s'y rattachant s'avèrent disponibles. Cependant, cette situation peut s'expliquer par le fait que pendant cette période il n'y avait pas de lois obligeant les entreprises à fermer les puits après la fin des opérations de forage, ou que les entreprises ont temporairement fermé les puits pendant cette période pour revenir plus tard et les fermer définitivement.

Le nombre plus ou moins élevé des forages effectués dans la région de la Montérégie avant l'année 1969 est dû au fait que pendant cette période, il n'y avait pas de règlements gouvernementaux qui encadraient les travaux dans ce domaine, et en regardant les caractéristiques des puits, on trouve que la majorité avait une faible profondeur ce qui signifie que les compagnies à cette époque ne disposaient pas de l'équipement nécessaire pour aller plus profondément. Par conséquent, les compagnies pétrolières avaient tenté de creuser d'autres puits en voisinage dans l'espoir de trouver des quantités d'hydrocarbures commercialisables. C'est pour cette raison que les puits forés à proximité généralement appartiennent à la même compagnie.

Au Québec, l'industrie pétrolière, dans son volet d'exploration et d'exploitation, a connu un déclin important dans les dernières années (début 20^e siècle). Cette diminution est due au fait que la région a un faible potentiel d'hydrocarbures récupérables, comme le confirmait le ministre de l'Énergie en 2017 lors d'une entrevue médiatique. Le ministre de cette époque a déclaré que « Selon l'état de la science et des connaissances que nous avons, le potentiel pétrolier au Québec est très, très faible. On parle plus de gaz » (déclaration du ministre Pierre Moreau sur les ondes du 98,5 FM, cité par (Shields, 2017)). Un autre ministre du gouvernement a soutenu les propos du ministre de l'Énergie, « Est-ce qu'on peut [exploiter] beaucoup de pétrole ? La réponse, c'est non. Il n'y en a pas vraiment de pétrole, au Québec », a affirmé la ministre de l'Environnement Isabelle Melançon au journal *Le Devoir* (Shields, 2017).

De même, les changements législatifs récents ont contribué eux aussi à ce déclin. Depuis les dernières décennies, le gouvernement du Québec a resserré les conditions de délivrance des permis de recherche et d'exploration des hydrocarbures sur l'ensemble de la province par rapport à ce qui était employé auparavant. En 2018, le gouvernement avait publié quatre règlements relatifs aux activités pétrolières et gazières, qui sont parmi les plus exigeants au monde en matière d'exigences techniques et environnementales (MERN, 2018b). Par conséquent, ces exigences réglementaires

ont inévitablement affecté la volonté des pétroliers d'investir au Québec. De plus, certaines compagnies ont vivement critiqué le manque d'infrastructures pétrolières au Québec, ce qui augmente les frais de transport et de stockage, comme le confirme la compagnie Repsol dans son mémoire déposé à la Commission parlementaire de l'agriculture, des pêcheries, de l'énergie et des ressources naturelles dans le cadre de la consultation publique menée en 2016 concernant le projet de loi 106 qui édicte la Loi sur les hydrocarbures (Repsol pétrole et gaz Canada, 2016). Enfin, la mobilisation des citoyens a joué un rôle majeur dans la contestation des projets extractivistes au Québec. En 2011, plusieurs manifestations ont eu lieu dans les grandes villes du Québec refusant de projet d'extraction des gaz de schiste (Batellier et Maillé, 2017; La Presse canadienne, 2011; Terral, 2014). Plus tard, on a assisté à d'autres mobilisations notamment en ce qui concerne la gestion des puits inactifs (Salvace, 2018; Shields, Alexandre, 2020; Toulgoat, 2017). Dernièrement, on a assisté à une opposition au projet GNL Québec à Saguenay où de nombreuses manifestations ont été tenues pour la lutte contre ce projet (Gauthier, 2020).

5.2 Cartographie des variables à l'étude

5.2.1 Environnement naturel

5.2.1.1 Eau souterraine

Les puits artésiens dans de nombreuses régions sont le seul moyen permettant à la population de s'approvisionner en eau, en particulier dans les zones ne disposant pas de réseau d'alimentation en eau potable. D'autre part, les puits artésiens sont l'un des moyens utilisés par les agriculteurs pour l'irrigation des cultures. Étant donné que la région de la Montérégie est fortement agricole, nous avons remarqué qu'un nombre important de puits artésiens ont été forés sur le territoire de la région. Cependant, les résultats de l'analyse ont montré que 83 puits inactifs (62%) avaient entre un et 60 puits artésiens dans une zone tampon de 1000 m.

Les eaux souterraines au Québec représentent une richesse naturelle renouvelable, et une source d'approvisionnement en eau douce capable de couvrir 90 % de la superficie habitée et d'assurer une alimentation pour près de 20% de la population québécoise (MDDELCC, 2016). Par conséquent, cette richesse doit être protégée contre les différentes sources de contamination potentielles. Dans cette perspective, le ministère de l'Environnement a lancé en 2008 un programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES) pour plusieurs régions du Québec (MELCC, s.d.-a). Bien que les hydrocarbures n'aient pas été cités comme une source de pollution à vérifier dans le mandat principal du ministère, certains projets ont recommandé des analyses supplémentaires sur le méthane et d'autres gaz (éthane, propane, hélium et radon) après que des concentrations de carbone inorganique dissous aient été enregistrées dans la composition chimique des eaux souterraines (Buffin-Bélanger *et al.*, 2015). En revanche, d'autres projets ont inclus le méthane comme substance à analyser dans leur processus comme l'étude de Pinti et ses collaborateurs (2013). Le projet PACES en Chaudière-Appalaches a montré des concentrations de méthane qui dépassent parfois les normes esthétiques recommandées (provinciaux et fédéraux), cependant, la signature isotopique avait confirmé que ce méthane est principalement d'origine biogénique, formé dans de faibles profondeurs (Lefebvre *et al.*, 2015). L'étude de Pinti et ses collaborateurs sur les eaux souterraines des Basses-Terres du Saint-Laurent a aussi révélé que le méthane avait une origine biogénique dominante, malgré que quelques concentrations de gaz thermogéniques aient été signalées (Pinti *et al.*, 2013).

Pour des fins de clarification, la différence entre les deux origines du méthane (biogénique et thermogénique) réside dans le fait que, le méthane biogénique est produit dans le sol à de faibles profondeurs grâce à la décomposition de la matière organique sous l'effet de l'action bactérienne, tandis que le méthane thermogénique est formé dans les réservoirs souterrains par la pyrolyse des hydrocarbures lourds sous l'effet de la température et la pression élevées (Clark et Fritz, 1997).

En l'absence de règlements sur les activités pétrolières et gazières au Québec, les compagnies avaient creusé des puits de pétrole et de gaz un peu partout sur le territoire de la province. De même, de nombreux puits artésiens ont été forés à proximité des puits inactifs, ce qui s'explique par le fait que les puisatiers ne consultaient pas le registre cadastral avant de choisir l'emplacement du forage, ou probablement que ces puits inactifs n'étaient pas encore enregistrés dans le registre foncier. D'autre part, les résultats de l'étude sur la qualité des eaux souterraines de la région de la Montérégie Est ont montré que la nappe phréatique dans cette région se trouve à faible profondeur, ce qui en fait un facteur favorisant la contamination des eaux souterraines (Carrier *et al.*, 2013). Par conséquent, la présence des puits de pétrole et de gaz inactifs dont la profondeur dépasse la nappe phréatique peut servir à une voie de transport des gaz parasites (méthane, propane, éthane, etc.) vers les eaux souterraines en voisinage (Banks *et al.*, 2019; D'Aniello *et al.*, 2020; Darrah *et al.*, 2012; Jackson *et al.*, 2013; Kissinger *et al.*, 2013; Molofsky *et al.*, 2013; Osborn *et al.*, 2011a, 2011b). Dans notre cas, nous n'avons pas été en mesure de confirmer ou d'infirmer cette hypothèse en raison du manque d'informations concernant la profondeur de la nappe phréatique dans la région de la Montérégie. En outre, selon des études, plus on rapproche de la source de pollution (les puits inactifs), plus la concentration des contaminants augmente (Jackson *et al.*, 2013; Osborn *et al.*, 2011a), suggérant que les puits artésiens proches des puits de pétrole ou de gaz inactifs sont plus vulnérables aux contaminants pétroliers et gaziers.

Finalement, le ministère de l'Environnement du Québec a mis en place des normes sur la qualité des eaux potables destinées à la consommation humaine, promulguées dans le *Règlement sur la qualité de l'eau potable*. À cet égard, le ministère recommande aux propriétaires de puits artésiens pour l'approvisionnement en eau potable de vérifier la qualité de ces eaux en réalisant des analyses au moins deux fois par année pour les paramètres microbiologiques tels que (les bactéries *E. coli*, les bactéries entérocoques et les coliformes totaux) et au moins une fois pendant la période de service d'un puits

d'eau pour les paramètres physico-chimiques tels que l'arsenic, le manganèse, le baryum, les nitrates-nitrites, le chlorure, le sodium, le fer, les sulfates, les fluorures et la dureté totale basée sur la teneur en calcium et en magnésium (MELCC, s.d). Cependant, il faudrait revoir la liste des substances en ajoutant les hydrocarbures les plus susceptibles d'y se présenter à savoir le méthane, le propane et l'éthane, ainsi que les seuils de concentration des contaminants établis par le ministère en les adaptant aux récentes recherches. Ceci permettrait de procéder à une caractérisation rigoureuse des eaux provenant des puits artésiens situant à proximité des puits de pétrole et de gaz inactifs.

5.2.2 Eau de surface

Depuis plusieurs années, le gouvernement du Québec surveille la qualité et l'évolution des eaux de surface dans l'ensemble de la province. Par conséquent, le ministère de l'Environnement a instauré plusieurs projets dans le but d'avoir un portrait complet sur la qualité du milieu aquatique (fleuve, rivières, lacs, ruisseaux, etc.). Ainsi, ces eaux demeurent plus vulnérables aux sources de pollution par rapport aux eaux souterraines, en raison de leur contact direct avec le sol et l'atmosphère. D'ailleurs, de nombreuses études menées dans la province ont signalé des dépassements des seuils de certains contaminants notamment dans les sous-bassins versants où les activités agricoles occupent une grande superficie des terres (Painchaud, 1997; Simard, 2004).

En Montérégie, nous avons dénombré 61 puits inactifs forés à moins de 1000 m du fleuve Saint-Laurent, dont cinq puits forés au milieu du fleuve. D'autre part, 23 puits inactifs se trouvent à moins de 1000 m d'un cours d'eau (autre que le fleuve Saint-Laurent). En fait, la proximité des forages du milieu hydrique s'explique par l'absence d'un cadre réglementaire à l'époque qui permet de protéger ces écosystèmes vulnérables des effets nocifs des puits de pétrole et de gaz tant pendant la période de service, qu'après la fermeture.

Bien que les récents projets d'acquisition des connaissances sur les eaux superficielles menés au Québec n'aient rapporté aucune source de contamination liée aux hydrocarbures d'origine thermogénique, il est essentiel de protéger ces eaux. En effet, les études d'Osborn (2011) et Jackson (2013) ont confirmé la présence de traces de certaines substances de la famille des hydrocarbures dans des échantillons d'eau prélevés des cours d'eau situés à proximité des puits de gaz de schiste (Jackson *et al.*, 2013; Osborn *et al.*, 2011a). Au final, les eaux de surface sont plus vulnérables aux polluants, car, ces derniers se propagent rapidement à cause du mouvement de l'eau dans les rivières et les lacs, ce qui accélère le transport de ces polluants vers d'autres cours d'eau.

Enfin, malgré les progrès rapportés par le MELCC sur la question de la protection des eaux de surface, en particulier celle du fleuve Saint-Laurent, il est à noter que La loi sur les hydrocarbures actuelle (entrée en vigueur en septembre 2018) n'a pas fermé la porte complètement aux forages dans les milieux hydriques. En effet, l'article 6 de la section II de cette loi précise ce qui suit : « Le ministre ne peut octroyer d'autorisation ou approuver d'activités en milieu hydrique **que si le titulaire d'une licence lui démontre que les activités prévues ne compromettent pas l'intégrité et la conservation du milieu hydrique** ».

5.2.3 Zones agricoles

Avec moins de 2% de la surface totale du Québec, les terres agricoles continuent à disparaître jour après jour, et ce, malgré l'adoption de la Loi sur la protection du territoire agricole depuis déjà 42 ans (CPTAQ, 2007). Ces sols de bonne qualité se trouvent principalement dans le sud de la province, plus précisément, sur la plaine du Saint-Laurent et ses affluents (MAPAQ, 2012).

Les résultats de l'analyse ont révélé que les zones agricoles couvrent la majeure partie de la superficie totale de la Montérégie. Ces champs constitués de bons sols ont fait de

la Montérégie le garde-manger du Québec avec un potentiel de 32% des recettes agricoles et 24% du coût des expéditions d'aliments réalisées au Québec (MAPAQ, 2020).

Nos résultats ont montré que 112 puits inactifs (84%) ont été forés au milieu ou à une distance de moins de 1000 m d'un champ agricole. Ceci s'explique par le fait que, pour les puits forés vers la fin du 19^e et le début du 20^e siècle, il n'y avait pas encore de cadre réglementaire pour ces activités de forage. En l'absence des réglementations, il y avait potentiellement certains puits qui ont été forés sur la base d'une entente entre le propriétaire de la terre et la compagnie pétrolière, alors que ces entreprises proposaient aux agriculteurs une compensation financière afin de leur permettre de creuser un puits sur leurs terres, à l'instar de ce qui est employé actuellement en Alberta et dans quelques régions au Québec où des puits de gaz de schiste ont été forés récemment (IEDM, 2015).

Au fil du temps, il y a eu un encadrement des activités pétrolières et gazières dans la région, notamment lorsque le gouvernement a obligé les compagnies pétrolières à acquérir une licence de recherche délivrée par les autorités compétentes avant de commencer les travaux et qu'elles devaient respecter la zone spécifiée dans la licence (la première licence d'exploration délivrée au Québec date de 1996 selon le registre public des droits réels et immobiliers relatifs aux hydrocarbures). À ce moment-là, la plupart des permis de recherche étaient délivrés sur des zones agricoles, étant donné que les nouvelles réglementations imposaient une certaine distance des zones urbaines à respecter pour effectuer les travaux de recherche (une distance de 100 m des habitations, d'un chemin de fer, d'un pipeline ou d'un chemin public, selon la dernière version du règlement sur le pétrole, le gaz naturel et les réservoirs souterrains de la Loi sur les mines abrogé le 20 septembre 2018 ; et d'une distance de 1000 m des habitations selon la Loi sur les hydrocarbures en vigueur en septembre 2018).

En effet, les agriculteurs qui ont au moins un puits inactif dans leurs champs sont exposés à de nombreux risques, tel que la contamination du sol en cas de fuite au niveau du puits inactif, la contamination des eaux d'irrigation suite à une fuite des hydrocarbures vers la nappe phréatique ou encore une contamination des eaux de surface. Comme les agriculteurs au Québec utilisent les eaux souterraines et superficielles pour l'irrigation des cultures, une contamination de ces eaux peut également entraîner des pénuries de production ou même endommager complètement les cultures. Une étude en Chine a confirmé que les cultures irriguées par des eaux souterraines ayant subi une pollution due à l'extraction des gaz de schiste ont été largement contaminées (Yang *et al.*, 2013).

En termes de risques sanitaires, avoir un puits inactif dans un champ agricole est très dangereux pour les personnes qui y habitent et y travaillent. Les fuites de pétrole ou de gaz des puits inactifs peuvent conduire à une explosion, d'autant plus qu'il est connu que les agriculteurs utilisent diverses machines mécaniques susceptibles d'être une source d'étincelle à l'origine de l'explosion. Dans le même contexte, de nombreuses études ont affirmé que la présence d'un puits profond, c'est-à-dire un puits qui dépasse la nappe phréatique, peu importe son utilisation (puits de pétrole ou de gaz conventionnel ou non-conventionnel ou encore un puits de géothermie), peut servir à une voie de transport des gaz parasites (méthane, propane, éthane, etc.) vers les eaux souterraines avec des concentrations pouvant atteindre des niveaux explosifs dans l'eau des puits artésiens situant à proximité (Banks *et al.*, 2019; D'Aniello *et al.*, 2020; Darrah *et al.*, 2012; Jackson *et al.*, 2013; Kissinger *et al.*, 2013; Molofsky *et al.*, 2013; Osborn *et al.*, 2011a, 2011b).

En plus des impacts environnementaux et sanitaires, de nombreux propriétaires ont acheté leurs terres sans savoir qu'il s'y trouvait des puits inactifs, ce qui pourrait avoir une incidence négative sur la valeur de la propriété. D'autre part, ces propriétaires de terrains se retrouvent devant plusieurs lois. D'un côté, ils sont tenus d'informer le

MERN en cas de découverte de puits inactifs sur leurs terres et toute violation expose le propriétaire à des sanctions (selon l'article 8 de la récente Loi sur les hydrocarbures). D'un autre côté, le MELCC peut ordonner au propriétaire du terrain de réaliser des travaux de réhabilitation dans le cas où une pollution est susceptible de porter atteinte à la vie, à la santé, au bien-être, au confort de l'humain, aux écosystèmes, aux autres espèces vivantes ou sur l'environnement, serait constatée dans sa propriété (selon l'article 31.43 de la Loi sur la qualité de l'environnement).

5.2.4 Réseau ferroviaire

Historiquement, les chemins de fer ont grandement contribué au développement des nations, ils ont joué un rôle central dans l'épanouissement de l'économie mondiale (Mansour, 2006). La carte du réseau ferroviaire de la région de la Montérégie a montré que les chemins de fer ont permis de relier les différentes zones de la région entre elles, en plus de connecter la Montérégie avec l'extérieur.

Pour l'industrie pétrolière, la présence de chemin de fer a été l'un des facteurs clés pour la commercialisation des hydrocarbures. Au Canada, avant la construction des pipelines, les wagons-citernes avaient été l'un des moyens les plus utilisés pour le transport du pétrole des zones productrices vers les zones consommatrices, ce qui a largement contribué au développement du pays (Mcnamara, 2015). Certains pays avaient relié les zones de stockage et les raffineries aux chemins de fer afin de faciliter le transport des hydrocarbures (Mansour, 2006). Pour le même but, d'autres avaient construit leurs infrastructures proches des chemins de fer.

Au Québec, la Loi sur les hydrocarbures n'exige pas de laisser une distance entre une voie ferrée et un puits de pétrole ou de gaz. Par contre, le règlement fédéral sur le forage et l'exploitation des puits de pétrole et de gaz au Canada exige une distance de 76 m entre l'emplacement des puits ou des trous de sondage et une voie ferrée. Puisque les compagnies pétrolières au Québec ne sont soumises qu'à la réglementation provinciale,

de nombreux puits de pétrole et de gaz ont été forés ainsi proche des chemins de fer. Les résultats de l'analyse ont montré qu'en Montérégie, sur les 50 puits forés à moins de 1000 m d'un chemin de fer, 34 puits ont été réalisés entre 1949 et 1963, alors que dans cette période de nombreux chemins de fer étaient déjà opérationnels. Cependant, la raison pour laquelle les compagnies avaient choisi de s'approcher du réseau ferroviaire pourrait être purement logistique.

5.2.5 Établissements scolaires

Les résultats de la distribution des puits inactifs par rapport aux établissements scolaires de la région de la Montérégie ont révélé que 19% des puits inactifs (n=25) avaient entre un et six établissements scolaires dans une zone tampon de 1000 m. Cette situation est préoccupante, puisque ces écoles accueillent des enfants et des adolescents de cinq à 18 ans. Ce groupe est particulièrement vulnérable aux contaminants, étant donné que les enfants respirent beaucoup plus d'air par rapport aux adultes (Kleinman, 2000). La présence de fuite de gaz d'un puits inactif près d'une école peut nuire à la santé de ces enfants, d'autant plus qu'ils sont fortement exposés en raison du temps qu'ils passent à l'école. D'autre part, il y a également un risque de contact direct avec des puits inactifs qui pourraient se trouver à proximité des établissements scolaires, ce qui peut aussi causer de graves conséquences.

Les résultats ont révélé aussi que les puits situant à proximité des écoles ont tous été forés avant 1963 (à l'exception des deux puits AZ09 et AZ43 qui n'ont pas une date de forage connue et A157 qui était foré en 1971). En revanche, nous avons constaté que les écoles ont été construites après le forage de ces puits. Cela est probablement dû au fait que la majorité des puits inactifs n'étaient pas encore enregistrés dans le registre foncier. En fait, ce n'est qu'en 2018 que la Loi sur les hydrocarbures a adopté un texte réglementaire obligeant toute personne découvrant un puits dans son terrain à aviser par écrit le ministre de l'Énergie et des Ressources naturelles, qui à son tour inscrit au

registre foncier une déclaration faisant état de la localisation du puits (Article 8 de la loi sur les hydrocarbures).

5.2.6 Hôpitaux

Les résultats en Montérégie ont montré que la majorité des hôpitaux se situent loin des puits inactifs, à l'exception de l'hôpital Hôtel-Dieu de Sorel qui a été construit en 1945, c'est-à-dire avant l'année de forage des puits situant à proximité (B025, B026 et B027 qui ont été forés en 1961). Par conséquent, ceci corrobore le fait que pendant cette période, il n'y avait pas de réglementation obligeant les compagnies pétrolières à s'éloigner des zones urbaines pour faire des travaux d'exploration. D'autant plus, l'hôpital se trouve à environ 400 m du fleuve Saint-Laurent, et que dans cette période de nombreuses compagnies avaient tenté de creuser des puits en se basant sur des résultats des travaux effectués en Gaspésie et Bas-Saint-Laurent qui ont estimé la présence des quantités d'hydrocarbures exploitables le long du fleuve.

Cependant, la présence des puits inactifs à proximité des hôpitaux est susceptible d'avoir des conséquences néfastes sur la santé des personnes qui y séjournent en raison de leur vulnérabilité aux contaminants. Généralement, les hôpitaux accueillent les personnes de différentes catégories d'âge (enfants, adultes ou personnes âgées), mais l'immunodépression est un facteur commun chez ces personnes. En effet, ces personnes immunodéprimées constituent une catégorie particulièrement à risque puisque le fait de prendre des médicaments affaiblit le système immunitaire en endommageant d'autres cellules, ce qui rend le corps très faible face aux agents toxiques (Bonnet et Evrard, 2018; Chevalier, 2003). Par ailleurs, de nombreuses substances chimiques de toxicité aiguë peuvent s'échapper de ces puits et avoir des effets néfastes sur la santé de ces personnes comme nous l'avons déjà présenté dans la section 1.2.4.

5.2.7 Densité de la population

À la lumière de ce qui était présenté sur la densité de la population montréalaise en fonction des aires de diffusion (AD) et en corrélation avec les données indiquant le nombre d'habitants par AD, nous observons que la Montérégie avait une population inégalement répartie, de sorte que nous voyons un nombre d'habitants très élevé ainsi qu'une forte densité dans des zones de faible superficie, contrairement aux AD ayant une grande surface où le nombre d'habitants et la densité étaient très faibles. En regardant la répartition des AD sur le territoire de la région, nous constatons que les grandes AD se trouvent principalement dans les zones agricoles, par contre les petites AD se situent dans les zones urbaines (villes). Ceci explique les résultats précédents, car dans les exploitations agricoles, le nombre de personnes qui y vivent est souvent faible (inclus principalement les propriétaires et quelques travailleurs) par rapport au nombre de personnes vivant en ville.

Les résultats illustrant l'emplacement des puits inactifs par rapport à la répartition de la population ont indiqué que 85% des puits inactifs ont été forés dans des AD ayant une faible densité ($> 0 - 1000$ habitants au km^2), c'est-à-dire dans ou près d'un champ agricole, ce qui a été déjà démontré dans la section 4.1.3.3. Par ailleurs, la présence de certains puits inactifs (11% du nombre total des puits) dans des zones urbaines ayant une densité supérieure à 1000 habitants au km^2 , peut être justifiée par le fait que pendant la période de forage de ces puits, il n'y avait pas des réglementations qui obligeaient les compagnies de laisser une certaine distance des zones urbaines pour forer un puits, ou que les puits avaient été forés loin des villes, mais avec l'expansion urbaine, d'autres bâtiments ont été construits à proximité de ces puits sans vérifier le registre foncier, ou encore, les puits inactifs n'ont pas été enregistrés dans le registre cadastral. Enfin, il était difficile de tirer des conclusions par rapport aux caractéristiques des puits inactifs, étant donné qu'il y avait de nombreux puits inactifs de profils différents forés dans des AD ayant des densités d'habitants similaires.

En fait, la présence des puits inactifs en zones urbaines pose un risque plus important par rapport aux autres environnements, à cause du nombre élevé de personnes y vivent et de la proximité du danger, si bien que les puits se trouvent ainsi proche des maisons, par contre, dans les zones agricoles, le risque est moins important, car les puits se trouvent souvent au milieu des champs et il y a peu de personnes. Toutefois, nous ne pouvons ignorer le risque auquel seraient exposées les personnes qui vivent ou travaillent dans les champs agricoles en cas d'accident, comme expliqué dans la section 5.4.

5.2.8 Densité des enfants de moins de 5 ans

Les résultats de la répartition de la densité des enfants de moins de 5 ans dans la région de la Montérégie ont montré une forte corrélation avec ceux de la répartition de la population de tous les groupes d'âge, de sorte que les zones urbaines (avec des AD de petites superficies) ont enregistré une forte densité, tandis que les zones agricoles (avec de grandes zones de distribution) ont enregistré une faible densité. Plus spécifiquement, les AD ayant une forte densité des enfants de moins de 5 ans se concentrent principalement dans la MRC de Longueuil (municipalités de Longueuil, Brossard et Saint-Lambert). Cette concentration peut s'expliquer par le fait que ces zones accueillent davantage de jeunes familles et un grand nombre d'immigrant.es en raison de leur proximité de la métropole. D'ailleurs, selon les dernières statistiques, les immigrant.es forment 20,3% de la population de l'agglomération de Longueuil (Communauté métropolitaine de Montréal, 2019). De plus, selon un rapport du ministère de l'Immigration publié en 2019, 87% des personnes immigrantes admises au Québec entre 2014 et 2018 avaient moins de 45 ans, et 22% de l'ensemble se composait d'enfants de moins de 14 ans (MIDI, 2019). D'autre part, les jeunes familles sont basées principalement dans les zones urbaines proches des services essentiels (Agglomération de Longueuil, 2016).

En fait, la présence de puits inactifs dans ces zones où se trouve une proportion importante d'enfants de moins de 5 ans est une réelle menace pour leur santé. Les études ont confirmé qu'en raison des fenêtres de sensibilité pendant la croissance, il existe de nombreux impacts négatifs des contaminants environnementaux sur la santé du fœtus et de l'enfant (Chance et Harmsen, 1998), notamment en lien avec le fait que les enfants respirent 20 à 50% plus d'air que les adultes, ce qui augmente le risque d'exposition aux contaminants (Kleinman, 2000).

5.3 Analyse de données multivariées

5.3.1 Analyse en composantes principales (ACP)

L'exécution de la première ACP pour notre jeu de données a révélé des résultats complexes à interpréter. En effet, lorsque nous obtenons des variables qui saturent sur plus d'un facteur de façon significative, il s'avère difficile d'identifier quelles variables correspondent à quel facteur. En principe, la rotation orthogonale des axes a été développée pour contrer cet inconvénient et de rendre les résultats plus simples à expliquer. Cependant, dans notre cas et malgré la rotation Varimax, nous avons eu certaines variables qui saturaient sur plus d'un facteur. Dans certaines disciplines (psychométrie), il est recommandé d'éliminer les variables qui saturent de façon étrange de la matrice de données et de refaire l'ACP de nouveau (CeSCuP, 2015). Tandis qu'en écologie, les auteurs proposent de laisser l'ensemble des variables tel qu'il est construit à l'origine et en interprétant les résultats de l'ACP tout en prenant les variables à faible saturation en considération (Legendre et Legendre, 2012).

Typiquement, lorsque l'on remarque des saturations étranges dans une ACP, cela signifie que les variables associées ne contribuent pas fortement à l'explication de l'axe correspondant. Dans notre cas, les projections des variables sur les axes (Figure 4.18, 4.19 et 4.20) ont bien illustré ce phénomène. Cependant, cet inconvénient est dû au fait

que les variables associées à ces saturations ont des valeurs proches les unes des autres pour l'ensemble des puits inactifs (ça pourrait être des valeurs supérieures ou égales à zéro). D'ailleurs les résultats de la cartographie ont montré que certaines variables n'ont pas été enregistrées autour de plusieurs puits inactifs, à l'instar des cours d'eau, les chemins de fer, et les hôpitaux. En effet, les données quantitatives provenant d'études portant sur l'environnement et ses composantes contiennent souvent de nombreuses valeurs nulles (Legendre et Legendre, 2012).

En analysant les résultats des corrélations entre les variables et les facteurs après rotation Varimax présentés dans le Tableau 4.19, nous avons pu identifier les variables qui définissent chaque facteur. Pour les facteurs D1, D2 et D3, nous avons remarqué qu'ils avaient entre deux et quatre variables qui contribuent très fortement à l'explication de ces axes, contrairement à l'axe D4 qui était défini par des variables ayant de faibles saturations. En revanche, les projections sur les axes (Figures 4.18, 4.19 et 4.20) ont confirmé les remarques tirées du tableau. Cela dit que les composantes D1, D2 et D3 avaient un impact significatif dans la répartition des puits inactifs sur le graphique des observations (Figure 4.22).

Puisque les facteurs D1 et D2 mis en commun portent la majeure partie des informations contenues dans cette ACP, nous les avons gardés pour la projection et l'interprétation des résultats. Cependant, les quatre facteurs expliquent environ 44% de l'information contenue dans le jeu de données. Nous sommes conscients que ce pourcentage est plus ou moins faible, mais comme cité auparavant, les études en écologie et en science de la terre rencontrent souvent ce problème. Toutefois, nous suggérons pour les prochains travaux d'inclure davantage de variables considérant les résultats des inspections des puits inactifs qui seront publiés prochainement par le MERN. L'ajout des variables pourrait contrer ou éliminer le bruit causé par les variables qui ont des valeurs nulles.

Finalement, bien que les limites signalées, nos résultats ont été assez raisonnables, de sorte que le graphique des observations projeté sur les deux axes D1 et D2 a montré une distribution des puits inactifs plus ou moins compatibles avec ce qui était trouvé plus tard avec la CAH.

5.3.2 La classification ascendante hiérarchique (CAH)

La classification hiérarchique est un moyen utilisé pour regrouper les observations présentant des profils similaires. Dans notre cas, nous avons utilisé la CAH afin de confirmer et illustrer les résultats de l'ACP. Le dendrogramme généré par cette CAH nous a permis de distinguer un nombre important de profils des puits inactifs. Puisque le choix du nombre de classes est arbitraire et dépend de l'intention du chercheur, nous avons choisi un regroupement en trois classes. En effet, le dendrogramme montre qu'au-delà de trois classes, nous risquons d'avoir les puits AZ43 et B025 seuls dans deux classes séparées. En regardant les caractéristiques des ces deux puits, nous avons remarqué que le puits AZ43, malgré qu'il soit attribué à la classe 1, présente un profil différent des autres puits : il est le seul à avoir un nombre important de puits artésiens dans les quatre zones tampons par rapport aux autres puits de sa classe. Quant au puits B025, qui est attribué à la classe 2, diffère des autres puits par la caractéristique Densité de population, de sorte que la densité de l'AD où se trouve ce puits est très élevée par rapport aux autres AD où se trouve le reste des puits de sa classe.

La classe 1 est constituée de puits qui se trouvent dans des AD ayant une forte densité de population. Les puits inactifs de cette classe se situent généralement loin des cours d'eau, mais proche des établissements scolaires. L'analyse des caractéristiques des puits inactifs regroupés dans la classe 1 montre que les variables 'Densité de population de toutes les catégories d'âge' et 'Densité des enfants de moins de 5 ans' ont joué un rôle important dans la détermination des puits inactifs de cette classe. Cependant, les variables associées aux écoles et aux zones agricoles ont eu un impact minime sur cette distribution ce qui justifie probablement la position étrange des deux puits B026 et

B100 qui se positionnent dans ce groupe malgré la faible densité d'habitants des AD dans lesquelles ils sont situés. Les écoles se trouvent souvent dans des zones où la densité de population est importante (notamment celle des enfants), ce qui explique la proximité des puits inactifs de ce groupe à la fois des zones à forte densité de population et des écoles. Enfin, les résultats de ce groupe ont été plus ou moins compatibles avec ce qui était présenté dans le graphique des observations de l'ACP (Figure 4.22).

La classe 2 inclue les puits qui sont forés généralement à proximité du fleuve Saint-Laurent, mais loin des cours d'eau, des établissements scolaires et des zones agricoles. Les caractéristiques des puits inactifs de cette classe reflètent que les variables associées à la proximité du fleuve Saint-Laurent (FS1, FS2, FS3 et FS4) avec la variable « Réseau ferroviaire dans la zone >750 – 1000 m » avaient la plus grande responsabilité dans l'identification des puits inactifs de cette classe. Cependant, la carte de distribution de la population (Figure 4.13) montre que les AD proches du fleuve Saint-Laurent ont généralement une faible densité d'habitants (à l'exception de certaines zones urbaines). Ceci explique le fait d'avoir moins d'établissements scolaires autour de ces puits inactifs (les écoles se trouvent généralement dans les zones peuplées). De plus, en analysant les cartes du réseau hydrographique et celle des champs agricoles (Figures 4.4 et 4.6, respectivement) nous constatons qu'il y a moins de cours d'eau et de champs agricoles à proximité du fleuve Saint-Laurent (en particulier dans la région du nord où se trouve la majorité des puits inactifs de cette classe). En revanche, nous avons remarqué que les puits AZ09, B025 et B133 se trouvent dans des AD ayant une densité de population élevée (928 hab./km², 1551,7 hab./km² et 850 hab./km², respectivement, tandis que les autres puits se trouvent dans des AD où la densité ne dépasse pas 180 hab./km²), pourtant, ils ont été regroupés dans cette classe. Ce choix avait probablement été impacté par les variables ayant une faible saturation sur certains axes à l'instar des variables associées aux puits artésiens (PA1, PA2, PA3 et PA4).

La classe 3 regroupe les puits qui se trouvent à moins de 250 m d'un champ agricole. Le regroupement des puits inactifs dans cette classe a été essentiellement constitué sur la base des variables associées aux zones agricoles (CA1, CA2, CA3 et CA4). En effet, nous remarquons que la majorité de ces puits inactifs avaient des puits artésiens dans l'une des zones tampons, ceci est dû au fait que les agriculteurs forent des puits d'eau dans leurs champs agricoles pour l'irrigation des cultures et pour l'approvisionnement en eau potable. L'absence des établissements scolaires s'explique par le fait que ces puits se trouvent loin des zones urbaines où il y a peu de personnes d'âge scolaire.

Finalement, comme remarque générale, nous avons constaté que les hôpitaux n'avaient pas d'impact significatif sur le regroupement des puits comme c'était le cas pour les cours d'eau (même si certaines zones tampons associées aux cours d'eau avaient un impact minime), ce qui s'explique par l'absence des puits inactifs proches de ces variables (seulement trois puits avaient été signalés dans la zone tampon de 1000 m des hôpitaux). D'autre part, plusieurs puits ayant des profils similaires n'ont pas été regroupés dans la même classe par la CAH, contrairement aux résultats de l'ACP où ces puits ont été bien présentés dans le graphique des observations, à l'instar des puits A208, A209, A210, A211 et A212 qui avaient des caractéristiques plus ou moins similaires et des positions proches dans le graphique des observations de l'ACP (Figure 4.22), mais qu'ils ont été partagés sur deux classes différentes lors de la CAH. Ceci dit que la classification hiérarchique n'est pas un outil de prise de décision, mais bel et bien un outil d'aide à la décision et qu'il est recommandé de procéder à une ACP parallèlement.

Enfin, en termes de priorité, les puits inactifs de la classe 1 devraient recevoir plus d'attention de la part des décideurs en raison des risques qu'ils présentent. En effet, la présence de ces puits à proximité des zones résidentielles densément peuplées pose un danger pour la population, notamment pour les enfants, en particulier les puits qui sont forés à proximité des écoles. En deuxième lieu, les puits inactifs de la classe 2

nécessiteraient aussi d'être pris en considération par les autorités en raison de leur proximité du fleuve Saint-Laurent qui demeure un écosystème qu'on doit protéger contre toutes sources de pollution. Les puits inactifs de la classe 3 ne posent pas de danger immédiat pour la population, car ils sont forés principalement dans des champs agricoles où on trouve une faible densité de population. Ils pourraient cependant poser un risque pour les champs agricoles et les puits artésiens qui constituent la source d'eau potable pour les personnes vivant en milieu rural. Cependant, cette classification est préliminaire et il serait également nécessaire de prendre en compte les résultats des inspections du MERN lors de la prise de décision.

5.4 Forces et limites de la recherche

5.4.1 Forces de la recherche

Ce mémoire est la première étude ayant mis en évidence la vulnérabilité pour l'environnement et la santé humaine face à la présence des puits de pétrole et de gaz inactifs au Québec et a pris comme zone d'étude la région de la Montérégie. Les résultats ont montré que ces puits représentent une source potentielle de pollution susceptible de nuire à la qualité de l'environnement et à la santé humaine.

Cette étude est la première à utiliser la cartographie de la vulnérabilité comme étant un outil d'aide à la décision pour la priorisation des puits inactifs lors de la planification des travaux de réparation. Fondée sur une approche écosystémique, cette étude a permis de mettre en évidence la complexité de la question des puits de pétrole et de gaz inactifs. En effet, le fait d'avoir un puits inactif, peu importe son emplacement et sa situation, représente un risque pour au moins une composante de l'écosystème. Par conséquent, il est difficile d'estimer les risques sur l'environnement et sur la santé des personnes associés à ces puits, étant donné que plusieurs facteurs sont susceptibles d'entrer en interaction. L'exemple des fuites de méthane permet d'illustrer cette difficulté.

Évidemment, une fuite de méthane dans un aquifère pourrait causer des risques pour la santé à long terme, tandis que, si ce gaz s'échappe dans l'atmosphère et en présence d'une étincelle est capable de causer un risque immédiat sur la sécurité des personnes. Ainsi, si la fuite se produit dans un puits inactif se trouvant dans une zone éloignée, elle présente peu de risque par rapport à une fuite dans un puits inactif dans une zone peuplée.

D'autre part, l'approche écosystémique utilisée dans le cadre de cette étude a exposé une sorte d'inégalité et d'injustice qui pourrait être liée à la question des puits inactifs. En effet, il est reconnu que les inégalités sont à l'origine de propagation des maladies résultant de la détérioration de la qualité de l'environnement, de plus, les gens habitant dans les zones défavorisées ont un accès limité aux services de soins (Charron, 2012). Cette étude a révélé que certaines zones comptent plus de puits inactifs que d'autres. Cela nous conduit à questionner si les gens qui logent proche de ces puits vivent dans des conditions socioéconomiques différentes que les autres régions. Il serait donc pertinent d'en savoir plus sur la situation socioéconomique de ces régions dans les futurs travaux afin de répondre à cette hypothèse.

Dans le même contexte, de nombreux puits ont été forés dans des terres agricoles, alors que ces puits n'ont pas été enregistrés dans le registre cadastral de la région. Aujourd'hui, ces agriculteurs sont confrontés à de nombreux risques à savoir la contamination du sol susceptible de causer une baisse de l'activité agricole, la contamination de la nappe phréatique dont ils dépendent pour l'irrigation et leur approvisionnement en eau potable, les risques d'explosions en cas de fuite de gaz et la baisse de la valeur de leur propriété. De plus, ils sont appelés à informer le MERN en cas de découverte de tout équipement ou indice indiquant la présence potentielle d'un puits dans leurs terrains et toute violation expose le propriétaire à des sanctions (selon l'article 8 de la loi sur les hydrocarbures). D'un autre côté, MELCC a le droit d'ordonner au propriétaire du terrain de réaliser des travaux de réhabilitation dans le

cas où une pollution capable de porter atteinte à la vie, à la santé, au bien-être, au confort de l'humain, aux écosystèmes, aux autres espèces vivantes ou sur l'environnement, serait constatée dans sa propriété selon l'article 31.43 de la Loi sur la qualité de l'environnement. Cette forme d'inégalité est susceptible d'affecter les activités agricoles et les autres activités qui s'y rattachent à l'instar du secteur agroalimentaire d'autant plus qu'ils sont une source importante d'emploi en Montérégie et dans plusieurs régions du Québec.

Les études ont confirmé que les enfants, les femmes et les personnes sous traitement médical sont plus sensibles aux polluants (Chance et Harmsen, 1998; Kleinman, 2000; Tran *et al.*, 2020; Walker Whitworth *et al.*, 2018). La présente étude a révélé que plusieurs puits inactifs se trouvent près des habitations (quartiers résidentiels, écoles et hôpitaux). Dans ce cas, nous signalons que certains groupes pourraient être plus vulnérables aux effets des puits inactifs que d'autres. Il serait donc pertinent de procéder à une caractérisation rigoureuse de l'état de santé de ces catégories de personnes dans les régions ayant connu des puits inactifs.

Cette étude et malgré les limites signalées, a permis de proposer une classification des puits inactifs de la région de la Montérégie qui pourrait être utilisée dès maintenant par les autorités locales, non seulement pour faire les travaux de correction immédiats, mais aussi pour prendre connaissance du risque que présente chaque puits. De plus, l'approche adoptée dans ce mémoire est applicable pour le reste du Québec et même ailleurs.

La présente étude nous a conduits dans un premier temps, en faisant une analyse documentaire, à identifier les variables qui font face aux impacts négatifs des puits inactifs. Nous avons illustré pour chaque variable une carte permettant de cartographier sa vulnérabilité sur une zone tampon de 1000 m autour de chaque puits inactif. Comme nous l'avons mentionné précédemment, de nombreux puits se trouvent ainsi proches

de ces variables, ce qui augmente la fréquence d'exposition, d'autant plus que les conséquences sur la santé dépendent de la durée et l'étendue de la contamination. Par conséquent, nous avons donc pu définir la vulnérabilité dans le contexte des puits inactifs. En effet, elle se caractérise par le degré et la fréquence d'exposition, les moyens que ces populations utilisent pour contrer les effets de ces puits et la capacité de ces espèces à faire face aux effets négatifs de ces puits. Par conséquent, nous avons mis en évidence des facteurs permettant de quantifier la vulnérabilité des personnes dans de telles situations.

Les résultats ont aussi confirmé que les effets négatifs des puits inactifs n'affectent pas de la même façon tous les groupes d'une même communauté (voire de la même famille). Ces catégories sont susceptibles d'être divisées selon plusieurs critères : genre (femme/homme), groupes d'âge (fœtus, enfants, adultes et personnes âgées), domaine d'emploi, état de santé et la situation socioéconomique. Par conséquent, nous soulignons l'importance d'inclure ces critères comme des facteurs de vulnérabilité additionnels pour les prochains travaux.

D'un côté, il est important de mentionner que les jeunes enfants sont plus sensibles non seulement aux effets négatifs des contaminants provenant des puits inactifs, mais aussi en cas de contact direct avec un ou plusieurs équipements de ces puits, notamment ceux qui se trouvent dans des zones habitées . D'un autre côté, l'étude de San Sebastián et ses collaborateurs (2002) sur les communautés autochtones de l'Amazonie équatorienne exposées aux polluants des compagnies pétrolières, a confirmé que la grossesse chez les femmes de ces communautés se terminait souvent par une fausse couche (San Sebastián *et al.*, 2002). De plus, des études ont démontré que les femmes portent un plus grand fardeau face aux changements environnementaux mondiaux par rapport aux hommes. Elles se retrouvent plus souvent avec des moyens d'adaptation limités face aux changements environnementaux (Cutter, 1995; Silventoinen *et al.*, 2000).

Il importe de mentionner le rôle que joue l'agriculture et les secteurs qui s'y rattachent dans le développement économique la région de la Montérégie. Comme nous l'avons présenté dans les résultats, cette région assure la production d'une grande partie des aliments pour la province, et par conséquent de milliers d'emplois sont assurés pour la communauté. Cependant, nous avons remarqué que plusieurs puits se trouvaient dans des champs agricoles, ce qui rend les personnes qui y habitent ou y travaillent vulnérables aux effets négatifs de ces puits. Dans ce cas, la vulnérabilité pourrait affecter ces groupes non seulement au niveau de la santé et la sécurité, mais aussi au niveau socioéconomique.

Finalement, il est connu que les personnes sous traitement médical et les personnes âgées ont un système immunitaire faible ou affaibli par l'effet de traitements médicaux. Ceci rend ce groupe particulièrement vulnérable aux agents toxiques de toutes natures. Dans notre cas, nous avons constaté que les hôpitaux de la Montérégie sont majoritairement loin des puits inactifs et par conséquent le risque est moins important par rapport aux autres variables. Par ailleurs, comme dans plusieurs pays dans le monde, au Québec, nous trouvons une catégorie d'habitations destinées aux personnes âgées qui ont besoin de soins de santé (CHSLD), cependant, nous ne les avons pas inclus dans notre recherche, car la durée de séjour des personnes dans ces établissements se diffère d'un cas à un autre et par conséquent il a été difficile d'estimer la vulnérabilité de ce groupe.

Enfin, nous avons remarqué que la question des puits inactifs ne se limite pas sur une seule catégorie de personnes et que plusieurs facteurs peuvent entrer en interaction. Il est donc important de voir le problème de plusieurs angles tout en assurant une participation équitable de toutes les composantes susceptibles d'être affectées par les effets négatifs de ces puits.

5.4.2 Limites de la recherche

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé les rapports d'inspection des puits inactifs qui datent de 2018 ou avant. Cependant, ces rapports ne sont pas complets. Parfois les rapports d'inspection indiquaient que le puits était conforme aux critères établis par le MELCC alors que le puits n'était pas localisé à l'origine pour effectuer les tests nécessaires. Cette situation remet en question l'exactitude des coordonnées géographiques inscrites dans ces rapports, que nous avons utilisées pour cartographier la position des puits en fonction des variables de la cartographie. Plus tard en 2020, le ministère a commencé à diffuser de nouveaux rapports pour certains puits qui contiennent plus d'informations, notamment en ce qui concerne la présence des contaminants. Pour nous, c'était trop tard pour recommencer le travail et inclure les résultats des inspections comme variables à l'étude, malgré la pertinence d'avoir ce type de données.

D'autre part, la présente étude est basée essentiellement sur des données gouvernementales publiées dans des bases de données ministérielles. D'autres méthodes de collecte de données auraient été possibles, cependant, pour des raisons liées au temps et aux ressources, nous n'étions pas en mesure d'effectuer de tels travaux. À cet égard, une étude de terrain pourrait être effectuée pour les futures recherches en impliquant les différentes parties prenantes dans le cadre d'une recherche participative.

CONCLUSION

Les enjeux environnementaux et sanitaires relatifs aux activités pétrolières et gazières sont multiples. En effet, la phase post-exploitation du segment amont de l'industrie pétrolière assume certainement une partie de ces impacts. Cependant, nous ne trouvons que peu d'études qui s'intéressent à cette question. Cela nous amène à poser les questions suivantes : connaissons-nous les impacts environnementaux et sanitaires posés par les puits de pétrole et de gaz inactifs? Connaissons-nous les voies d'exposition de la population aux effets des puits inactifs, et enfin, connaissons-nous les groupes de la société les plus susceptibles d'être affectés par les effets de ces puits ?

Les impacts sur l'environnement et sur la santé humaine des puits inactifs étaient le contexte de notre projet de recherche. Par ailleurs, nous avons préféré étudier cette question à une échelle locale. Nous avons donc choisi la Montérégie au Québec comme zone d'étude. L'objectif était de dresser un portrait de l'évolution des forages pétroliers et gaziers dans cette région pendant la période 1900-2010 pour ensuite cartographier la vulnérabilité des milieux naturels, bâtis et humains face à la présence de ces puits. Enfin, notre dernier objectif était de classer les puits inactifs de cette région selon leurs profils. Cette étude constitue un début d'un sujet de recherche très large qui mérite plus de travaux de terrain qui permettraient de bien saisir les effets environnementaux et sanitaires des puits inactifs.

L'examen des données relatives aux puits pétroliers et gaziers publiés dans les bases de données ministérielles nous a permis de recenser 133 puits en statut inactif en

Montérégie. Ces derniers sont répartis principalement dans le nord et le nord-ouest de la région, dont 71 puits ont été forés entre 1960 et 1969. D'autre part, les résultats de la cartographie ont révélé que 62% des puits inactifs avaient au moins un puits artésien à moins de 1000 m, tandis que 46% ont été forés à moins de 1000 m du fleuve Saint-Laurent. Dans le même contexte, nous avons remarqué que la majorité des puits ont été forés dans des zones agricoles ayant une faible densité de population. Enfin, nous avons constaté que certains puits se trouvaient proches de chemins de fer et d'établissements scolaires. L'analyse des résultats a montré que l'absence de réglementations encadrant les activités pétrolières et gazières au Québec a permis aux entreprises de forer des puits sans tenir compte de ce qui se trouve à proximité.

Les méthodes d'analyse multivariée de données (ACP et CAH) ont révélé la présence de trois classes de puits avec de profils semblables. La première classe regroupe des puits situés dans des zones très densément peuplées. La deuxième classe regroupe des puits forés près du fleuve Saint-Laurent. Dans la dernière classe, nous trouvons principalement les puits forés dans des zones agricoles.

La présente étude et malgré les limites déjà évoquées, a permis d'aborder un problème qui suscite, depuis plusieurs années, des mobilisations sociales au Québec. Nous avons réussi à proposer une approche pour prioriser les puits inactifs à réparer qui peut être utilisée pour le reste du Québec. Notre approche s'appuie principalement sur le nombre et le type des variables (naturelles, bâties ou humaines) présents autour de chaque puits.

Nous proposons pour les prochaines études d'inclure les résultats des inspections, notamment après la divulgation des rapports d'inspection par le MERN (peut-être à la fin de l'année 2020). D'autre part, une recherche participative s'avère nécessaire pour intégrer au processus les parties prenantes à savoir les agriculteurs, les personnes habitant à proximité des puits inactifs, les membres des regroupements citoyens actifs dans ce secteur, etc. Une collaboration avec les experts du ministère pourrait aussi aider

à acquérir plus d'informations sur ce dossier. Cette étape permettrait de comprendre la question des puits inactifs de plusieurs points de vue et de mieux saisir sa complexité.

Étant donné que la majorité des puits de pétrole et de gaz inactifs au Québec sont sans responsables officiels ou que ceux-ci n'ont pas les ressources nécessaires pour remédier aux problèmes de ces puits, le gouvernement du Québec doit, dans plus les brefs délais, adopter un plan de correction des puits problématiques, et ce, pour éviter d'éventuels incidents pouvant nuire à l'environnement et à la santé et la sécurité de la population. Pour ce faire, nous recommandons de créer un organisme qui aura pour mission de localiser, inspecter et réparer les puits inactifs forés au Québec. L'idée est déjà employée dans les provinces de l'Ouest à l'image de Orphaned Well Association en Alberta et BC Oil & Gaz Commission à British Columbia (Gouvernement du Canada, 2020a). Un tel organisme pourrait aussi collaborer avec les regroupements de citoyens comme RVHQ et AQLPA, qui ont démontré leur volonté de participer aux opérations de recherche et d'inspections des puits inactifs en coordination avec le ministère sous l'initiative de « chasseurs de puits inactifs ».

ANNEXE A

LISTE DES COMPAGNIES ET DES OPÉRATEURS AYANT EFFECTUÉ DES TRAVAUX DE FORAGE PÉTROLIER OU GAZIER DANS LA RÉGION DE LA MONTÉRÉGIE

Responsable	Opérateur	Nombre de puits	Identifiant
Bow Valley Industries Ltd	Bow Valley Industries Ltd	1	1
Gastem Inc	Gastem Inc	1	2
A.B. International Prospecting Co.	A.B. International Prospecting Co.	1	3
Inconnu	Aumacho River Mines Ltd oper	2	4
Inconnu	Bald Mountain Oil Co	4	5
Canac Exploration	Canac Exploration	1	6
Inconnu	Canadian Eastern Oil & Gas Drilling Ltd	1	7
Inconnu	Canadian Natural Gas Co.	6	8
Inconnu	Canadian Seabord Oil & Gas Ltd	1	9
Inconnu	Canso Natural Gas Ltd.	3	10
Inconnu	Cartier Natural Gas Co	1	11
Inconnu	Département de Milice et Défense du Canada	1	12
Ditem Explorations Inc	Ditem Explorations Inc	2	13
Inconnu	Dufresne Engineering Company operator	1	14
Eastern Canada Gas & Oil Ltd	Eastern Canada Gas & Oil Ltd	7	15
Inconnu	Hamilton Powder Company	1	16
Imperial Oil Ltd	Lowlands Exploration Ltd	4	17
Inconnu	Laduboro Oil Ltd.	4	18
Inconnu	Les Huiles Prospères Inc	45	19
Inconnu	Louis Coupal	1	20

Liste des compagnies et des opérateurs ayant effectué des travaux de forage dans la région de la Montérégie (Suite)

Responsable	Opérateur	Nombre de puits	Identifiant
Lowlands Exploration Ltd	Lowlands Exploration Ltd	1	21
Lozo Oil Co	Lozo Oil Co	2	22
Inconnu	National Gas Company	2	23
Inconnu	New Miller Copper Mines Ltd	3	24
Inconnu	New Miller Pipe Lines & Mining Exploration	13	25
Inconnu	Quebec Lowlands Gas & Oil Ltd	1	26
Ressource & Énergie Squatex Inc	Canbriam Energy Inc	1	27
Inconnu	Richelieu Gas Co	1	28
SNC Lavalin	SNC Lavalin	4	29
Salem Exploration Ltd	Salem Exploration Ltd	2	30
Société Acadienne De Recherches pétrolières	Société Acadienne De Recherches pétrolières	1	31
Société d'Exploration de l'Estrie	Société d'Exploration de l'Estrie	1	32
Soquip	Soquip	8	33
St. Johns Petroleum Co	St. Johns Petroleum Co	1	34
St. Lawrence River Oil Co	St. Lawrence River Oil Co	1	35
Texaco Canada Ressources Ltd	Texaco Canada Ressources Ltd	1	36
Inconnu	The Quebec Fuel Company	4	37
Tioxide Canada Inc	Ken E. Davies Associates	1	38
Inconnu	Vicomte Roger de Roumefort	1	39
Inconnu	Yvon L'Heureux	2	40
Inconnu	Inconnu	8	Inconnu

BIBLIOGRAPHIE

- Aba, T. et Kavak, O. (2019). Environmental Effects of Petroleum Leaks Around Diyarbakir City (SE Anatolia of Turkey) and Its Environment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (1 éd., vol. 221). doi: 10.1088/1755-1315/221/1/012041
- Addinsoft. (2020). *XLSTAT statistical and data analysis solution*. (version 2020.4.1). Paris, France. Récupéré de <https://www.xlstat.com>
- Addy, R., Lawson, F. et Turnbull, H. (2016). Deepwater ghana abandoned and suspended wells monitoring and verification process; A basis for prevention of future unwanted environmental leakages of wellbore fluids. *Society of Petroleum Engineers - SPE African Health, Safety, Security and Environment and Social Responsibility Conference and Exhibition 2016* (p. 106-121). doi: <https://doi.org/10.2118/183583-MS>
- Agence internationale de l'énergie (AIE). (2018, 17/10/2020). Interviewé par. Data and statistics: World-Balances 2018. Dans AIE (prod.), Récupérée de <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables?country=WORLD&energy=Balances&year=2018>
- Agglomération de Longueuil. (2016). *Schéma d'aménagement et de développement de l'agglomération de Longueuil : Portrait de l'agglomération de Longueuil*. Récupéré de https://www.longueuil.quebec/sites/longueuil/files/publications/schema_aménagement_et_developpement_agglomeration_de_longueuil.pdf
- Aguilera, F., Méndez, J., Pásaro, E. et Laffon, B. (2010). Review on the effects of exposure to spilled oils on human health. *Journal of Applied Toxicology: An International Journal*, 30(4), 291-301. doi: <https://doi.org/10.1002/jat.1521>

- Ajayi, T., Torto, N., Tchokossa, P. et Akinlua, A. (2009). Natural radioactivity and trace metals in crude oils: implication for health. *Environmental geochemistry and health*, 31(1), 61-69. doi: 10.1007/s10653-008-9155-z
- Akinyede, A., Akintonwa, A., Olayemi, S. et Emeka, P. (2006). Investigating the Idoho oil spillage into Lagos: Some confounding health factors. *Nigerian Journal of Health and Biomedical Sciences*, 5(2), 89-93. doi: 10.4314/njhbs.v5i2.11606
- Allen, D. T. (2014). Atmospheric emissions and air quality impacts from natural gas production and use. *Annual review of chemical and biomolecular engineering*, 5, 55-75. doi: 10.1146/annurev-chembioeng-060713-035938
- Amadi, A. N. (2014). Impact of gas-flaring on the quality of rain water, groundwater and surface water in parts of Eastern Niger Delta, Nigeria. *Journal of Geosciences and Geomatics*, 2(3), 114-119. doi: 10.12691/jgg-2-3-6
- Ana, G. R., Sridhar, M. K. et Bamgboye, E. A. (2009). Environmental risk factors and health outcomes in selected communities of the Niger delta area, Nigeria. *Perspectives in Public Health*, 129(4), 183-191. doi: 10.1177/1466424008094803
- Archambault, S. et Toussaint, J.-P. (2016). Risques et impacts associés à l'exploration et à l'exploitation des hydrocarbures dans le golfe du Saint-Laurent. *Le Naturaliste canadien*, 140(2), 35-40. doi: <https://doi.org/10.7202/1036501ar>
- Avci, C. B. (1994). Evaluation of flow leakage through abandoned wells and boreholes. *Water Resources Research*, 30(9), 2565-2578. doi: <https://doi.org/10.1029/94WR00952>
- Banks, E. W., Hatch, M., Smith, S., Unterschultz, J., Lamontagne, S., Suckow, A. et Mallants, D. (2019). Multi-tracer and hydrogeophysical investigation of the hydraulic connectivity between coal seam gas formations, shallow groundwater and stream network in a faulted sedimentary basin. *Journal of Hydrology*, 578, 124132. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124132>
- Barclay, I., Pellenbarg, J., Tettero, F., Pfeiffer, J., Slater, H., Staal, T., . . . Whitney, C. (2001). The beginning of the end: a review of abandonment and decommissioning practices. *Oilfield review*, 13(4), 28-41.

- Bastin, D. (2018, 19 mars). Puits abandonnés : le manque de personnel du ministère est criant. *La Relève* (Québec). Récupéré de <https://www.lareleve.qc.ca/2018/03/19/puits-abandonnes-manque-de-personnel-ministere-criant/>
- Batellier, P. et Maillé, M.-È. (2017). *Acceptabilité sociale: sans oui, c'est non* Écosociété.
- Becerra, S. (2012). Vulnérabilité, risques et environnement: l'itinéraire chaotique d'un paradigme sociologique contemporain. *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*, 12(1).
- Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I. et Wisner, B. (2014). *At risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters* Routledge.
- Bonnet, B. et Evrard, B. (2018). Allergies et médicaments: mécanismes de présentation de l'antigène au système immunitaire adaptatif. *Revue française d'allergologie*, 58(3), 126-127. doi: <https://doi.org/10.1016/j.reval.2018.02.201>
- Boris, R. (2013). L'effondrement d'un forage réalisé par Total en 1978 menace de polluer les eaux de Ouargla, l'un des plus grands oasis sahariens. Récupéré de *Nouara Algérie: écologie et environnement en Algérie* <http://www.nouara-algerie.com/article-l-effondrement-d-un-forage-realise-par-total-en-1978-menace-de-polluer-les-eaux-de-ouargla-l-un-de-119241015.html>
- Bouchard-Bastien, E. et Gervais, M.-C. (2016). Relation entre les activités de l'industrie des hydrocarbures, la qualité de vie et la santé psychologique et sociale. Dans *Santé environnementale* [Revue des connaissances]. Québec : Institut national de santé publique du Québec. Récupéré de https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/2104_relation_hydrocarbures_qualite_vie_sante.pdf
- Bourdillon, R. (2017, 5 novembre). À la chasse aux puits abandonnés. *Ricochet* (Québec). Récupéré de <https://ricochet.media/fr/2056/a-la-chasse-aux-puits-abandonnes>
- Boyle, M. D., Soneja, S., Quirós-Alcalá, L., Dalemarre, L., Sapkota, A. R., Sangaramoorthy, T., . . . Sapkota, A. (2017). A pilot study to assess residential noise exposure near natural gas compressor stations. *PloS one*, 12(4), e0174310. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174310>

- BRGM. (s.d.). *Techniques de forage*. Récupéré de <http://sigessn.brgm.fr/spip.php?article33>
- Brisson, G., Campagna, C., Carrier, G., Chevalier, P., Deger, L., Gauvin, D., . . . Smargiassi, A. (2010). *État des connaissances sur la relation entre les activités liées au gaz de schiste et la santé publique: Rapport préliminaire*. Québec : Institut national de santé publique du Québec. Récupéré de https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/1177_relgazschistesantepubrapreliminaire.pdf
- Brisson, G., Gervais, M.-C., Thibault, C., Allard, R., Bouchard-Bastien, E., Deger, L., . . . Poulin, P. (2014). *État des connaissances sur la relation entre les activités liées au gaz de schiste et la santé publique*. [Revue des connaissances]. Institut national de santé publique du Québec. Direction de la santé environnementale et de la toxicologie. Récupéré de https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/1749_etatconnrelaactgaszschistesantepubl_maj.pdf
- Brundtland, G. H., Khalid, M., Agnelli, S., Al-Athel, S. et Chidzero, B. (1987). Our common future. *New York*, 8.
- Buffin-Bélanger, T., Chaillou, G., Cloutier, C., Touchette, M., Héту, B. et McCormack, R. (2015). *Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du nord-est du Bas-Saint-Laurent (PACES-NEBSL)*. Université du Québec à Rimouski. Récupéré de <http://www.environnement.gouv.qc.ca/PACES/rapports-projets/BasStLaurent/BSL-scientif-UQAR-201503.pdf>
- Bureau du vérificateur général du Canada. (2009). *Rapport du commissaire à l'environnement et au développement durable* (Automne 2009). Gouvernement du Canada. Récupéré de https://www.oag-bvg.gc.ca/internet/Francais/parl_cesd_200911_02_f_33197.html
- Bureau international du Travail. (2016). *La sécurité et la santé au travail et les compétences dans l'industrie du pétrole et du gaz opérant dans les zones climatiques polaires et subarctiques de l'hémisphère Nord* (Première édition 2015 éd., Vol.). Genève : Bureau international du Travail. Récupéré de https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_dialogue/---sector/documents/publication/wcms_438075.pdf

- Campbell, J. (2016, 06 juin). Pétrole et gaz naturel : prouver sa valeur pour vendre à l'étranger. Récupéré de *Exportation et développement Canada (EDC)* <https://www.edc.ca/fr/blogue/serie-secteurs-petrole-gaz-naturel.html>
- Cao, J. et Gertler, J. (2002). The effect of insufficient excitation in PCA estimation. *Proceedings of the 2002 American Control Conference (IEEE Cat. No. CH37301)* (vol. 4, p. 2707-2712). IEEE. doi: 10.1109/ACC.2002.1025196
- Carrier, M.-A., Lefebvre, R., Rivard, C., Parent, M., Ballard, J.-M., Benoît, N., . . . Laurencelle, M. (2013). *Portrait des ressources en eau souterraine en Montérégie Est, Québec, Canada*. INRS, Centre Eau Terre Environnement. Récupéré de <http://espace.inrs.ca/id/eprint/1639/1/R001433.pdf>
- Casey, J. A., Savitz, D. A., Rasmussen, S. G., Ogburn, E. L., Pollak, J., Mercer, D. G. et Schwartz, B. S. (2016). Unconventional natural gas development and birth outcomes in Pennsylvania, USA. *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*, 27(2), 163. doi: 10.1097/EDE.0000000000000387
- Cattell, R. B. (1966). The scree test for the number of factors. *Multivariate behavioral research*, 1(2), 245-276. doi: https://doi.org/10.1207/s15327906mbr0102_10
- CeSCuP. (2015, 30 avril). *L'analyse factorielle en composantes principales*. Récupéré le 27/09/2020 de <https://cescup.ulb.be/lanalyse-factorielle-en-composantes-principales/>
- Chance, G. W. et Harmsen, E. (1998). Children are Different: Environmental Contaminants and Children's Health. *Canadian Journal of Public Health*, 89, S10-S15. doi: 10.1007/BF03405089
- Charron, D. F. (2012). *La Recherche Écosanté en pratique: Applications novatrices d'une approche écosystémique de la santé* (vol. 2) Springer. doi: 10.1007/978-4614-5281-2
- Chevalier, P. (2003, juin 2003). *Personnes vulnérables aux infections microbiennes*. Québec : Institut national de santé publique du Québec. Récupéré de <https://www.inspq.qc.ca/eau-potable/personnes-vulnerables?themekey-theme=mobile>

- Chevalier, P., Poulin, P., Valcke, M., Bourgault, M.-H., Smargiassi, A., Laplante, L., . . . Adib, G. (2015). *Enjeux de santé publique relatifs aux activités d'exploration et d'exploitation des hydrocarbures gaziers et pétroliers* (S. e. Évaluation d'impact sur la santé, Eau potable, Trans.). [Rapport de recherche, d'étude ou d'analyse]. Québec : Institut national de santé publique du Québec. Récupéré de https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/1957_enjeux_exploration_exploitation_hydrocarbures.pdf
- Chinedu, E. et Chukwuemeka, C. K. (2018). Oil spillage and heavy metals toxicity risk in the Niger delta, Nigeria. *Journal of Health and Pollution*, 8(19), 180905. doi: <https://doi.org/10.5696/2156-9614-8.19.180905>
- Clark, I. D. et Fritz, P. (1997). *Environmental isotopes in hydrogeology* CRC press.
- Clayton, J. A. et Collins, F. S. (2014). Policy: NIH to balance sex in cell and animal studies. *Nature News*, 509(7500), 282.
- CNESST. (2002). *Fiche complète pour Propane Répertoire toxicologique*. Récupéré de https://www.csst.qc.ca/prevention/reptox/Pages/fiche-complete.aspx?no_produit=8896#ref_1_2
- CNESST. (2010). *Fiche complète pour Méthane Répertoire toxicologique*. Récupéré de https://www.csst.qc.ca/prevention/reptox/Pages/fiche-complete.aspx?no_produit=8896#ref_1_2
- Communauté métropolitaine de Montréal. (2019, Mai 2019). *L'immigration internationale: principal facteur d'accroissement démographique dans le grand montréal* (38). Communauté métropolitaine de Montréal. Récupéré de https://cmm.qc.ca/wp-content/uploads/2019/05/38_Perspective.pdf
- Cornwall, A. (2003). Whose voices? Whose choices? Reflections on gender and participatory development. *World development*, 31(8), 1325-1342. doi: [https://doi.org/10.1016/S0305-750X\(03\)00086-X](https://doi.org/10.1016/S0305-750X(03)00086-X)
- Cornwall, A. et Jewkes, R. (1995). What is participatory research? *Social science & medicine*, 41(12), 1667-1676.

- Cossé, R. (1988). *Techniques d'exploitation pétrolière: Le gisement* (vol. 1) Éditions Technip.
- CPTAQ. (2007, 05 novembre). *Le zonage agricole a 40 ans*. Récupéré le 11/09/2020 de <http://www.cptaq.gouv.qc.ca/index.php?id=28>
- CPTAQ. (s.d.). *Zone agricole* Récupéré le 19/08/2020 de http://www.cptaq.gouv.qc.ca/cartographie/pdf/A_Lire_zone_agricole.pdf
- Cutter, S. L. (1995). The forgotten casualties: women, children, and environmental change. *Global environmental change*, 5(3), 181-194.
- Cutter, S. L. (1996). Vulnerability to environmental hazards. *Progress in human geography*, 20(4), 529-539. doi: <https://doi.org/10.1177/030913259602000407>
- D'Andrea, M. A. et Reddy, G. K. (2014a). Crude oil spill exposure and human health risks. *Journal of occupational and environmental medicine*, 56(10), 1029-1041. doi: 10.1097/JOM.0000000000000217
- D'Andrea, M. A. et Reddy, G. K. (2014b). Health Risks Associated with Crude Oil Spill Exposure. *The American Journal of Medicine*, 127(9). doi: <https://doi.org/10.1016/j.amjmed.2014.04.035>
- D'Aniello, A., Fabbricino, M., Ducci, D. et Pianese, D. (2020). Numerical Investigation of a Methane Leakage from a Geothermal Well into a Shallow Aquifer. *Groundwater*, 58(4), 598-610. doi: <https://doi.org/10.1111/gwat.12943>
- Darrah, T., Vengosh, A., Jackson, R., Warner, N. et Poreda, R. (2012). *Constraining the source and migration of natural gas in shallow aquifers within active shale gas production zone: insights from integrating noble gas and hydrocarbon isotope geochemistry, vol. 6*.
- Davies, R. J., Almond, S., Ward, R. S., Jackson, R. B., Adams, C., Worrall, F., . . . Whitehead, M. A. (2014). Oil and gas wells and their integrity: Implications for shale and unconventional resource exploitation. *Marine and Petroleum Geology*, 56, 239-254. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.03.001>

- Décamps, H. (2007). La vulnérabilité des systèmes socioécologiques aux événements extrêmes: exposition, sensibilité, résilience. *Natures Sciences Sociétés*, 15(1), 48-52. doi: 10.1051/nss:2007023
- Données Québec. (2016, 01 mars 2018). *Réseau ferroviaire*. Récupéré le 18/08/2020 de <https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/reseau-ferroviaire/ressource/4aceb906-cb8b-4bed-9d51-6051f12cc754>
- Données Québec. (2020). *Données Québec: Le carrefour collaboratif en données ouvertes québécoises*. Récupéré le 2020/08/30 de <https://www.donneesquebec.ca>
- Dusseault, M., Gray, M. N. et Nawrocki, P. A. (2000). Why oilwells leak: cement behavior and long-term consequences. *International Oil and Gas Conference and Exhibition in China*. Society of Petroleum Engineers. doi: <https://doi.org/10.2118/64733-MS>
- Eakin, H. et Luers, A. L. (2006). Assessing the vulnerability of social-environmental systems. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, 31, 365-394. doi: <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.30.050504.144352>
- Elkin, H. F. (1968). Petroleum refinery emissions. Dans *Sources of Air Pollution and Their Control: Air Pollution* (p. 97-121). New York : Academic press.
- Esterhuyse, S., Sokolic, F., Redelinghuys, N., Avenant, M., Kijko, A., Glazewski, J., . . . Vos, A. T. (2017). Vulnerability mapping as a tool to manage the environmental impacts of oil and gas extraction. *Royal Society open science*, 4(11), 171044. doi: <https://doi.org/10.1098/rsos.171044>
- Filteau, M. (2017, 16/11/2017). *Un large front commun demande le retrait des projets de règlement sur les hydrocarbures*. Récupéré le 05/10/2020 de <https://www.rvhq.ca/un-large-front-commun-demande-le-retrait-des-projets-de-reglement-sur-les-hydrocarbures/>
- Filteau, M. (2018). *COMMUNIQUÉ : Puits d'hydrocarbures abandonnés : des groupes pressent le gouvernement de publier les rapports d'inspection réalisés en 2015 par l'AQLPA* [Communiqué]. Québec : RVHQ. Récupéré de <https://www.rvhq.ca/puits-dhydrocarbures-abandonnes/>

- Forget, G. et Lebel, J. (2001). *An ecosystem approach to human health* Citeseer.
- Funtowicz, S. et Ravetz, J. R. (1994). Emergent complex systems. *Futures*, 26(6), 568-582. doi: <https://doi.org/10.22329/celt.v10i0.4745>
- Gauthier, M. (2020, 31 août 2020). Une manifestation contre GNL Québec organisée en prévision du BAPE. *leQuotidien* (Chicoutimi). Récupéré de <https://www.lequotidien.com/actualites/une-manifestation-contre-gnl-quebec-organisee-en-prevision-du-bape-a38e1193ff25a28e0342485ab315ebf8>
- Gillis, D., Nelson, J., Driscoll, B., Hodgins, K., Fraser, E. et Jacobs, S. (2017). Interdisciplinary and transdisciplinary research and education in Canada: A review and suggested framework. *Collected Essays on Learning and Teaching*, 10, 203-222.
- González, P., Trabelsi, S. et Jacques-Barma, S. (2015). Bilan des connaissances de l'économie des hydrocarbures au Québec. Récupérée de https://archives.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/oleoduc_energie-est/documents/ECON4.pdf
- Gouvernement du Canada. (2018). *Aire de diffusion: définition détaillée*. Récupéré le 15/08/2020 de <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/92-195-x/2011001/geo/da-ad/def-fra.htm>
- Gouvernement du Canada. (2020a). *Plan d'intervention économique du Canada pour répondre à la COVID-19 : nouveau soutien pour protéger les emplois canadiens*. Récupéré le 29/08/2020 de <https://www.canada.ca/fr/ministere-finances/nouvelles/2020/04/plan-dintervention-economique-du-canada-pour-repondre-a-la-covid-19--nouveau-soutien-pour-protger-les-emplois-canadiens.html>
- Gouvernement du Canada. (2020b). *Statistique Canada*. Récupéré le 16/08/2020 de <https://www.statcan.gc.ca/fra/debut>
- Gouvernement du Québec. (2016). *Politique Énergétique 2030: L'énergie des Québécois source de croissance* Récupéré de <https://mern.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/2016/04/Politique-energetique-2030.pdf>

- Gouvernement du Québec. (2019). *Histoire de l'industrie minière: Quelques dates marquantes*. Récupéré le 23/08/2020 de <https://mern.gouv.qc.ca/mines/industrie/industrie-diamant-hier-dates.jsp>
- Gouvernement du Québec. (2019A). *16- La Montérégie ainsi que ses municipalités régionales de comté (MRC)* Récupéré le 18/07/2020 de https://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/profils/region_16/region_16_00.htm
- Gouvernement du Québec. (2020). *Population selon le groupe d'âge et le sexe, Bas-Saint-Laurent et ensemble du Québec, 2001, 2006, 2011 et 2015-2019* Québec : Institut de la statistique du Québec Récupéré de https://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/profils/profil16/societe/demographie/demo_gen/pop_age16.htm
- Gouvernement du Québec. (s.d.). *Organisation territoriale: Montérégie (région 16)*. Récupéré le 16/08/2020 de <https://www.mamh.gouv.qc.ca/organisation-municipale/organisation-territoriale/regions-administratives/monteregie/>
- Hill, E. L. (2018, 2018/09/01/). Shale gas development and infant health: Evidence from Pennsylvania. *Journal of Health Economics*, *61*, 134-150. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhealeco.2018.07.004>
- IEDM. (2015, 27 mai). *Gaz de schiste : les agriculteurs québécois ratent une occasion en or*. Montréal : Récupéré de <https://www.iedm.org/fr/53480-gaz-de-schiste-les-agriculteurs-quebecois-ratent-une-occasion-en-or/>
- Jackson, R. B., Vengosh, A., Darrah, T. H., Warner, N. R., Down, A., Poreda, R. J., . . . Karr, J. D. (2013). Increased stray gas abundance in a subset of drinking water wells near Marcellus shale gas extraction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *110*(28), 11250-11255. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1221635110>
- Joseph, F. B., chl. (2019). *larmarange/analyse-R: Version du 6 mai 2019* (version 2019-05-06) : Zenodo. Récupéré de <https://doi.org/10.5281/zenodo.2669067>
- Kang, M., Christian, S., Celia, M. A., Mauzerall, D. L., Bill, M., Miller, A. R., . . . Jackson, R. B. (2016). Identification and characterization of high methane-emitting abandoned oil and gas wells. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *113*(48), 13636-13641. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1605913113>

- Kang, M., Mauzerall, D. L. et Celia, M. A. (2019). *Mitigating methane emissions from abandoned oil and gas wells* AGU.
- Kang, M., Mauzerall, D. L., Ma, D. Z. et Celia, M. A. (2019). Reducing methane emissions from abandoned oil and gas wells: Strategies and costs. *Energy Policy*, 132, 594-601. doi: 10.1016/j.enpol.2019.05.045
- Kassambara, A. (2017). *Practical guide to principal component methods in R: PCA, M (CA), FAMD, MFA, HCPC, factoextra* (vol. 2) STHDA.
- Kates, R. W., Ausubel, J. H. et Berberian, M. (1985). *Climate impact assessment*.
- Kelm, C. H. et Faul, R. R. (1999). *Well abandonment—A “best practices” approach can reduce environmental risk* doi: <https://doi.org/10.2118/54344-MS>
Récupéré de <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85054801177&partnerID=40&md5=65c10ae2f473eae7a58ee2829c3bacb2>
- King, G. E. et Valencia, R. L. (2014). *Environmental risk and well integrity of plugged and abandoned wells* Society of Petroleum Engineers. doi: <https://doi.org/10.2118/170949-MS>
- Kissinger, A., Helmig, R., Ebigbo, A., Class, H., Lange, T., Sauter, M., . . . Jahnke, W. (2013). Hydraulic fracturing in unconventional gas reservoirs: risks in the geological system, part 2. *Environmental earth sciences*, 70(8), 3855-3873. doi: 10.1007/s12665-013-2578-6
- Klein, S. L., Schiebinger, L., Stefanick, M. L., Cahill, L., Danska, J., De Vries, G. J., . . . Woodruff, T. K. (2015). Opinion: sex inclusion in basic research drives discovery. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(17), 5257-5258. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1502843112>
- Kleinman, M. T. (2000). *The health effects of air pollution on children* Récupéré de www.aqmd.gov/docs/default-source/students/health-effects.pdf
- Kovacic, Z. (2017, 2017/08/01). Investigating science for governance through the lenses of complexity. *Futures*, 91, 80-83. doi: <https://doi.org/10.1016/j.futures.2017.01.007>

- Kuhlman, T. et Farrington, J. (2010). What is sustainability? *Sustainability*, 2(11), 3436-3448. doi: <https://doi.org/10.3390/su2113436>
- La Presse canadienne. (2011, 6 septembre 2011). Des milliers d'opposants aux gaz de schiste manifestent à Montréal. *Le Devoir*. Récupéré de <https://www.ledevoir.com/societe/325829/des-milliers-d-opposants-aux-gaz-de-schiste-manifestent-a-montreal>
- Lafrance, G. (2002). *La boulimie énergétique, suicide de l'humanité?* Editions MultiMondes.
- Laliberté, J.-Y. (2002). *Le potentiel de découverte en hydrocarbures des régions ressources du Bas-Saint-Laurent et de la Gaspésie*. Récupéré le 28/08/2020 de <https://mern.gouv.qc.ca/mines/quebec-mines/2002-11/hydrocarbures.jsp>
- Lebel, J. (2003). La santé: une approche écosystémique. Canada, Ottawa, CRDI. *Un focus*.
- Leclerc, J.-M. (2014). Regard sur les composés BTEX dans les habitations canadiennes. *Bulletin d'information en santé environnementale (BISE)*.
- Lefebvre, R., Ballard, J., Carrier, M., Vigneault, H., Beaudry, C., Berthot, L., . . . Malet, X. (2015). *Portrait des ressources en eau souterraine en Chaudière-Appalaches, Québec, Canada* (300). Récupéré de <http://espace.inrs.ca/id/eprint/2658>
- Legard, N. (2014). En Équateur, la lutte organisée des associations contre l'exploitation pétrolière en Amazonie. *Pour*, 223(3), 287-298. doi: 10.3917/pour.223.0287
- Legendre, P. et Legendre, L. (2012). *Numerical ecology* Elsevier.
- Lessard, D. (2020, 5 mars). GNL Québec en péril. *La Presse* (Québec). Récupéré de <https://www.lapresse.ca/affaires/2020-03-05/gnl-quebec-en-peril>

- Malo, M., Lefebvre, R., Comeau, F.-A. et Séjourné, S. (2015). *Synthèse des connaissances portant sur les pratiques actuelles et en développement dans l'industrie pétrolière et gazière (1553)*. Québec : Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles. Récupéré de <https://mern.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/Chantier-technique.pdf>
- Mansour, J. (2006). The Hijaz-Palestine railway and the development of Haifa. *Jerusalem quarterly*, (28).
- MAPAQ. (2012). *Portrait agroalimentaire : La Montérégie* : Directions régionales de la Montérégie, secteurs est et ouest Récupéré de https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Publications/Portrait_agroalimentaire_monteregie.pdf
- MAPAQ. (2020, 02 mai). *La Montérégie, le Garde-Manger du Québec*. Récupéré le 11/09/2020 de <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Regions/monteregie/profil/Pages/garde-mangerduquebec.aspx>
- Maurice, J., Didier, M. et de Monchy, G. (2001). *Prix du pétrole* La Documentation française.
- Mayoux, L. (1995). Beyond naivety: Women, gender inequality and participatory development. *Development and change*, 26(2), 235-258. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1467-7660.1995.tb00551.x>
- Mazure, C. M. et Jones, D. P. (2015). Twenty years and still counting: including women as participants and studying sex and gender in biomedical research. *BMC Women's Health*, 15(1), 94. doi: 10.1186/s12905-015-0251-9
- McKenzie, L. M., Allshouse, W. et Daniels, S. (2019, 2019/11/01/). Congenital heart defects and intensity of oil and gas well site activities in early pregnancy. *Environment International*, 132, 104949. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104949>
- McKenzie, L. M., Guo, R., Witter, R. Z., Savitz, D. A., Newman, L. S. et Adgate, J. L. (2014). Birth outcomes and maternal residential proximity to natural gas development in rural Colorado. *Environmental health perspectives*, 122(4), 412-417. doi: <https://doi.org/10.1289/ehp.1306722>

- McMahon, P. B., Thomas, J. C., Crawford, J. T., Dornblaser, M. M. et Hunt, A. G. (2018, 2018/09/01/). Methane in groundwater from a leaking gas well, Piceance Basin, Colorado, USA. *Science of The Total Environment*, 634, 791-801. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.371>
- Menamara, A. (2015). *Exploration et production du pétrole*. : l'Encyclopédie Canadienne. Récupéré de <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/exploration-et-production-du-petrole>
- MDDELCC. (2014). *Lignes directrices provisoires sur l'exploration gazière et pétrolière*. Récupéré de <http://www.environnement.gouv.qc.ca/industriel/hydrocarbures/Lignes-directrices.pdf>
- MDDELCC. (2016). *Prévenir la contamination de l'eau souterraine par les pesticides: Pour protéger votre santé et l'environnement* : MDDELCC. Récupéré de <http://www.environnement.gouv.qc.ca/pesticides/eau-sout/depliant-prevenir-contamination.pdf>
- MDDEP. (2012). *Portrait de la qualité des eaux de surface au Québec 1999 – 2008* Québec : Direction du suivi de l'état de l'environnement. Récupéré de <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/portrait/eaux-surface1999-2008/chap3.pdf>
- MEES. (2020). *Programme de formation de l'école québécoise*. Récupéré le 11/08/2020 de <http://www.education.gouv.qc.ca/enseignants/pfeq/>
- MELCC. (s.d). *La qualité de l'eau de mon puits*. Récupéré le 11/09/2020 de <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/potable/depliant/index.htm#microbiologiques>
- MELCC. (s.d.-a). *Projets d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines*. Récupéré le 11/08/2020 de <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/souterraines/programmes/acquisition-connaissance.htm>
- MELCC. (s.d.-b). *Système d'information hydrogéologique (SIH)*. Récupéré le 11/08/2020 de <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/souterraines/sih/index.htm>

- Meng, Q. (2015, 2015/05/15/). Spatial analysis of environment and population at risk of natural gas fracking in the state of Pennsylvania, USA. *Science of The Total Environment*, 515-516, 198-206. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.02.030>
- MERN. (2014, octobre 2014). *Plan d'action gouvernemental sur les puits inactifs - Le gouvernement intensifie sa démarche d'inspection sous le sceau d'un partenariat inédit avec l'AQLPA*. Québec : Récupéré de <https://mern.gouv.qc.ca/presse/communiqués-detail.jsp?id=1092>
- MERN. (2016). *La carte interactive des hydrocarbures*. Échelle : 1/1 200 000. Québec : MERN. Récupéré de <http://sigpeg.mrn.gouv.qc.ca/gpg/hydrocarbures/hydrocarbures.htm>
- MERN. (2018a). *Loi sur les hydrocarbures – mesures transitoires*. Récupéré le 05/10/2020 de <https://mern.gouv.qc.ca/energie/hydrocarbures/mesures-transitoires/#:~:text=La%20Loi%20sur%20les%20hydrocarbures,régissait%20le%20domaine%20des%20hydrocarbures>.
- MERN. (2018b, 17 août). *Loi sur les hydrocarbures – Québec dit non aux hydrocarbures en milieu hydrique*. Québec : Gouvernement du Québec. Récupéré de <https://mern.gouv.qc.ca/loi-sur-les-hydrocarbures-quebec-dit-non-hydrocarbures-milieu-hydrique/>
- MERN. (2019a). *Histoire de l'industrie minière: quelques dates marquantes*. Récupéré le 01/09/2020 de <https://mern.gouv.qc.ca/mines/industrie/industrie-diamant-hier-dates.jsp>
- MERN. (2019b). *Importations de gaz naturel*. Récupéré le 15/09/2020 de <https://mern.gouv.qc.ca/energie/statistiques-energetiques/importations-gaz-naturel/>
- MERN. (2019c). *Importations et exportations de pétrole brut*. Récupéré le 15/09/2020 de <https://mern.gouv.qc.ca/energie/statistiques-energetiques/importations-exportations-petrole-brut/>
- MERN. (2019d). *Inspection des puits*. Récupéré le 27/03/2020 de <https://mern.gouv.qc.ca/energie/hydrocarbures/inspection-puits/>

- MERN. (2019e). *Plan d'action* Récupéré le 27/03/2020 de <https://mern.gouv.qc.ca/energie/hydrocarbures/inspection-puits/etat-situation/>
- MIDI. (2019). *Tableaux sur l'immigration permanente au Québec 2014-2018*. Direction de la recherche et de la statistique. Récupéré de <http://www.mifi.gouv.qc.ca/publications/fr/recherches-statistiques/Immigration-Quebec-2014-2018.pdf>
- MinesQC.com. (s.d). *Sites miniers orphelins: Historique, encadrement juridique*. Récupéré le 23/08/2020 de <http://minesqc.com/fiches-dinformatons/sites-miniers-orphelins-historique-encadrement-juridique/>
- Molofsky, L. J., Connor, J. A., Wylie, A. S., Wagner, T. et Farhat, S. K. (2013). Evaluation of methane sources in groundwater in northeastern Pennsylvania. *Groundwater*, 51(3), 333-349. doi: <https://doi.org/10.1111/gwat.12056>
- Mousseau, N. (2008). *Au bout du pétrole- Tout ce que vous devez savoir sur la crise énergétique* Éditions MultiMondes.
- MSSS. (2004). *Établissement ou installation ? Distinction entre établissement et installation*. Récupéré le 11/08/2020 de <https://m02.pub.msss.rtss.qc.ca/M02Distinction.asp>
- MTQ. (2014). *Partage des responsabilités et secteurs d'activité*. Récupéré le 09/09/2020 de https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/ministere/role_ministere/partage-responsabilite-activites/Pages/partage-responsabilites.aspx
- Nguyen, J.-P. (1993). *Le forage* Editions Technip.
- Nriagu, J. (2011). Oil industry and the health of communities in the Niger Delta of Nigeria. *Encyclopedia of Environmental Health*, 240-250.
- Nriagu, J., Udofia, E. A., Ekong, I. et Ebuk, G. (2016). Health risks associated with oil pollution in the Niger Delta, Nigeria. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(3). doi: 10.3390/ijerph13030346
- Odrú, P. (2013). *Le stockage de l'énergie-2e édition* Dunod.

- Ordinioha, B. et Brisibe, S. (2013). The human health implications of crude oil spills in the Niger delta, Nigeria: An interpretation of published studies. *Nigerian medical journal: journal of the Nigeria Medical Association*, 54(1), 10. doi: 10.4103/0300-1652.108887
- Osborn, S. G., Vengosh, A., Warner, N. R. et Jackson, R. B. (2011a). Methane contamination of drinking water accompanying gas-well drilling and hydraulic fracturing. *proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(20), 8172-8176. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1100682108>
- Osborn, S. G., Vengosh, A., Warner, N. R. et Jackson, R. B. (2011b). Reply to Saba and Orzechowski and Schon: Methane contamination of drinking water accompanying gas-well drilling and hydraulic fracturing. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(37), 665-666. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1109270108>
- Painchaud, J. (1997). *La qualité de l'eau des rivières du Québec: état et tendances* Ministère de l'environnement et de la faune, Direction des écosystèmes aquatiques, Québec.
- Pawlowska-Mainville, A. et Chapman, J. d. (2019). Ressources naturelles au Canada. Récupéré de *L'encyclopédie Canadienne* <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/ressources-6#:~:text=Le%20p%C3%A9trole%2C%20le%20gaz%20naturel,des%20mill%C3%A9naires%20C3%A0%20les%20cr%C3%A9er.>
- Pekney, N., Reeder, M., Sams, J., DeWitt, G. et Tinker, A. (2019). Methane emissions from abandoned oil and gas wells: A case study in Oil creek State Park, Pennsylvania. *Proceedings of the Air and Waste Management Association's Annual Conference and Exhibition, AWMA*.
- Pinti, D. L., Larocque, M., Barnetche, D., Retailleau, S., Moritz, A., Hélie, J.-F. et Lefebvre, R. (2013). *Concentrations, sources et mécanismes de migration préférentielle des gaz d'origine naturelle (méthane, hélium, radon) dans les eaux souterraines des Basses-Terres du Saint-Laurent: Volet géochimie* : INRS, Centre Eau Terre Environnement.

- Prasetya, A. E. et Herputra, S. A. (2018). The optimization for cost-effective well plug and abandonment techniques. *Society of Petroleum Engineers - SPE Symposium: Decommissioning and Abandonment 2018*. doi: <https://doi.org/10.2118/193987-MS>
- Québec Solidaire. (2016, 02/12/2016). *Puits inactifs et hydrocarbures - « À quand la transparence du gouvernement? »* - Manon Massé. Québec : Québec Solidaire. Récupéré de <https://quebecsolidaire.net/nouvelle/puits-inactifs-et-hydrocarbures-a-quand-la-transparence-du-gouvernement-manon-masse>
- Radio-Canada. (2016, 10 décembre). Le projet de loi sur les hydrocarbures adopté après une nuit de débats. *Radio-Canada* (Québec). Récupéré de <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1004990/assemblee-nationale-baillon-adoption-projet-loi-106-hydrocarbures-manifestation>
- Radio-Canada. (2020a, 16 février). Explosion d'un puits de gaz de schiste à Batiscan. Récupéré de <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1525186/explosion-puits-de-gaz-schiste-batiscan>
- Radio-Canada. (2020b, 31 août). Manifestation de la Coalition Fjord contre GNL Québec. *Radio-Canada*. Récupéré de <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1730435/protestation-bape-gaz-liquefie-usine>
- Repsol pétrole et gaz Canada. (2016, 11/08/2016). *Consultations particulières sur le projet de loi 106: loi concernant la mise en oeuvre de la politique énergétique 2030 et modifiant diverses dispositions législatives* [mémoire]. Récupéré de http://www.assnat.qc.ca/Media/Process.aspx?MediaId=ANQ.Vigie.Bll.Docu mentGenerique_115803&process=Default&token=ZyMoxNwUn8ikQ+TRK YwPCjWrKwg+vIv9rjj7p3xLGTZDmLVSmJLoqe/vG7/YWzz
- Ressources naturelles Canada. (2019a, 06 juin). *Énergie*. Récupéré le 15/09/2020 de <https://www.rncan.gc.ca/maps-tools-publications/tools/geodetic-reference-systems/energie/16873>
- Ressources naturelles Canada. (2019b, 21 juillet). *Énergie et économie*. Récupéré le 15/09/2020 de <https://www.rncan.gc.ca/science-donnees/donnees-analyse/donnees-analyse-energetiques/faits-saillants-sur-lenergie/energie-economie/20073>

- Riddick, S. N., Mauzerall, D. L., Celia, M. A., Kang, M., Bressler, K., Chu, C. et Gum, C. D. (2019, 2019/02/15/). Measuring methane emissions from abandoned and active oil and gas wells in West Virginia. *Science of The Total Environment*, 651, 1849-1856. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.082>
- Rogers, E. M. (1976). *Communication and development; critical perspectives* Sage.
- Salvace, F. (2018, 2018-02-27). *Monsieur Moreau, votre ministère a-t-il saboté les inspections des puits abandonnés?* 2018-02-27. Récupéré de <https://www.rvhq.ca/lettre-ouverte-et-demande-de-rencontre-au-ministre-de-lenergie-et-des-ressources-naturelles-monsieur-pierre-moreau/>
- San-Sebastián, M. et Karin Hurtig, A. (2004). Oil exploitation in the Amazon basin of Ecuador: a public health emergency. *Revista panamericana de salud pública*, 15, 205-211.
- San Sebastián, M. S., Armstrong, B. et Stephens, C. (2002, 2002/10/01). Outcomes of Pregnancy among Women Living in the Proximity of Oil Fields in the Amazon Basin of Ecuador. *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 8(4), 312-319. doi: 10.1179/107735202800338650
- Sarkis, N. (1971). Pétrole et développement économique dans les pays arabes. *Études internationales*, 2(4), 562-574. doi: 10.7202/700141ar
- Semmoud, B. (2010). Les hydrocarbures, mode majeur d’insertion dans l’économie mondiale. Dans *Maghreb et Moyen-Orient dans la mondialisation* (chap. 3, p. 73-102). Paris : Armand Colin.
- Shields, A. (2017, 19 décembre). Le potentiel pétrolier québécois est très faible, selon Québec. *LeDevoir*. Récupéré de <https://www.ledevoir.com/societe/environnement/515872/le-potentiel-petrolier-quebecois-est-tres-faible-selon-quebec>
- Shields, A. (2020, 1 février). Cent profs de l'UQAC s’opposent au projet de GNL Québec. *LeDevoir* (Québec). Récupéré de <https://www.ledevoir.com/societe/environnement/572019/une-centaine-d-enseignants-de-l-uqac-s-opposent-a-gnl-quebec>

- Shields, A. (2020, 9 septembre). Québec doit encore retrouver plus de 200 puits d'exploration pétrolière et gazière. *LeDevoir*, section Environnement. Récupéré de <https://www.ledevoir.com/societe/environnement/585543/hydrocarbures-des-centaines-de-puits-a-retrouver>
- Silventoinen, K., Kaprio, J., Lahelma, E. et Koskenvuo, M. (2000). Relative effect of genetic and environmental factors on body height: differences across birth cohorts among Finnish men and women. *American journal of public health*, 90(4), 627. doi: 10.2105/ajph.90.4.627
- Simard, A. (2004). *Portrait global de la qualité de l'eau des principales rivières du Québec*. Récupéré le 02/10/2020 de <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/global-2004/index.htm>
- Simon, B. (2016, 16 août). Hydrocarbures: pas d'expropriation sans l'accord d'un juge, rassure Arcand [Politique]. *LeSoleil* (Québec). Récupéré de <https://www.lesoleil.com/actualite/politique/hydrocarbures-pas-dexpropriation-sans-laccord-dun-juge-rassure-arcand-65f2be5e76376be12ad0bc98bef1eed9>
- Stafford, J. et Bodson, P. (2006). *L'analyse multivariée avec SPSS* Puq.
- Sutton, T., Athan, T., Raga, F., Nagase, K., Clos, M., Mayo, C., . . . Kranjc, J. (2004). *Manuel d'utilisation de QGIS* de https://docs.qgis.org/3.10/fr/docs/user_manual/index.html
- Terral, P.-M. (2014). Les oppositions au gaz de schiste dans le monde : des protestations nationales à un mouvement citoyen transnational ? [The fight against shale gas in the world: from national protests to a transnational citizen movement?]. *Écologie & politique*, 49(2), 81-94. doi: 10.3917/ecopo.049.0081
- Tetroe, J. (2007). Knowledge translation at the Canadian Institutes of Health Research: a primer. *Focus Technical Brief*, 18, 1-8.
- Tharrault, Y. (2008). *Diagnostic de fonctionnement par analyse en composantes principales: Application à une station de traitement des eaux usées*. Institut National Polytechnique de Lorraine. Récupéré de <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01748708>

- Toulgoat, M. (2017, 16 juin). Manque de surveillance des puits de pétrole abandonnés en Gaspésie. *RADIO-CANADA* (Gaspésie–Îles-de-la-Madeleine), section ENVIRONNEMENT. Récupéré de <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1040187/manque-surveillance-puits-petrole-abandonnes-gaspesie>
- Tran, K. V., Casey, J. A., Cushing, L. J. et Morello-Frosch, R. (2020). Residential Proximity to Oil and Gas Development and Birth Outcomes in California: A Retrospective Cohort Study of 2006–2015 Births. *Environmental Health Perspectives*, 128(6), 067001. doi: <https://doi.org/10.1289/EHP5842>
- Tremblay, H. et Kolli, K. (2016). L'Impact De La Fragmentation Du Droit Sur Le Développement Des Hydrocarbures Dans Le Golfe Du Saint-Laurent (The Impact of the Legal Framework's Fragmentation on Offshore Oil and Gas Development in the Gulf of the St. Lawrence). *SSRN* 32. doi: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2877553>
- Turner, B. L., Kasperson, R. E., Matson, P. A., McCarthy, J. J., Corell, R. W., Christensen, L., . . . Martello, M. L. (2003). A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the national academy of sciences*, 100(14), 8074-8079. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1231335100>
- Tveit, M. R., Khalifeh, M., Nordam, T. et Saasen, A. (2019). Fate of hydrocarbon leaks from plugged and abandoned wells compared to natural seepages. *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE* (vol. 8). doi: 10.1115/OMAE2019-95674
- UNEP. (1997). Environmental management in oil and gas exploration and production: an overview of issues and management approaches. *Joint E&P Forum - UNEP Technical Publication*. London, UK, 68.
- Walker Whitworth, K., Kaye Marshall, A. et Symanski, E. (2018). Drilling and production activity related to unconventional gas development and severity of preterm birth. *Environmental health perspectives*, 126(3), 037006. doi: <https://doi.org/10.1289/EHP2622>
- Ward Jr, J. H. (1963). Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American statistical association*, 58(301), 236-244.

- Watfa, M. (1991). Downhole casing corrosion monitoring and interpretation techniques to evaluate corrosion in multiple casing strings. *SPE Production Engineering*, 6(03), 283-290. doi: <https://doi.org/10.2118/17931-PA>
- Webb, J. C., Mergler, D., Parkes, M. W., Saint-Charles, J., Spiegel, J., Waltner-Toews, D., . . . Woollard, R. F. (2010). Tools for thoughtful action: the role of ecosystem approaches to health in enhancing public health. *Canadian Journal of Public Health*, 101(6), 439-441.
- Whitmore, J. et Pineau, P.-O. (2018). *État de l'énergie au Québec 2019*. Chaire de gestion du secteur de l'énergie, HEC Montréal. Récupéré de https://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2018/12/EEQ2019_WEB.pdf
- Wisn, J., Chesnaux, R., Werring, J., Wendling, G., Baudron, P. et Barbecot, F. (2020). A portrait of wellbore leakage in northeastern British Columbia, Canada. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(2), 913-922. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1817929116>
- Yang, H., Flower, R. J. et Thompson, J. R. (2013). Shale gas: pollution fears in China. *Nature*, 499(7457), 154-154. doi: <https://doi.org/10.1038/499154b>