

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

LES FEUX DE FORÊT COMME SOURCE DE PARTICULES FINES PM_{2.5} : LE CAS DU QUÉBEC

ESSAI

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR

KAHINA BEN ARAB

JUIN 2026

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce document diplômant 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. 12-2023). 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

Avant toute chose, je remercie Dieu pour la force, la patience et la persévérance qu’Il m’a accordées tout au long de ce parcours. Dans les moments de doute comme dans les moments de réussite, Sa présence m’a permis d’avancer et de mener ce projet à terme.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes parents et mes beaux-parents pour leur amour, leurs sacrifices et leur soutien indéfectible tout au long de mes études. Malgré la distance, leur confiance et leurs encouragements ont toujours été une source de motivation.

Je remercie également mon mari, qui a été mon principal soutien durant mon parcours au Canada. Sa présence, sa patience, sa compréhension et ses encouragements constants m’ont aidée à surmonter les défis rencontrés et à poursuivre mes objectifs avec confiance.

Je souhaite remercier tout particulièrement ma tutrice, Catherine, pour sa disponibilité, son accompagnement, ses précieux conseils et la confiance qu’elle m’a accordée tout au long de la réalisation de cet essai. Son soutien a grandement contribué à l’avancement de ce travail.

Une pensée particulière est également adressée à mon fidèle compagnon, mon chat, qui m’a accompagnée durant de nombreuses heures de rédaction. Sa présence discrète à mes côtés a apporté réconfort et sérénité pendant les longues journées de travail.

Je remercie chaleureusement l’ensemble des professeurs qui ont contribué à ma formation par leur enseignement, leur disponibilité, leur compréhension et leur engagement envers les étudiants.

Enfin, j’adresse mes remerciements à mes amis, à mes collègues ainsi qu’à toute la communauté universitaire de l’UQAM pour les échanges, l’entraide et les expériences partagées tout au long de ce parcours.

À toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à cette réussite, je témoigne ma plus sincère reconnaissance.

TABLES DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	ii
TABLES DES MATIÈRES	iii
LISTES DES FIGURES	iv
LISTES DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES	v
LISTES DES SYMBOLES ET DES UNITÉS.....	vi
RÉSUMÉ.....	vii
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 : REVUE DE LITTÉRATURE	3
1.1 Les feux de forêt au Québec.....	3
1.2 Les particules fines PM _{2,5} et la qualité de l'air	5
CHAPITRE 2 : PROBLÉMATIQUE.....	8
CHAPITRE 3 : MÉTHODOLOGIE	10
CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET ANALYSE.....	13
4.1. Répartition spatiale des feux de forêt et station de surveillance.....	13
4.2. Comparaison des concentrations de PM _{2,5} entre 2022 et 2023	15
4.3. Dépassements de la norme quotidienne des PM _{2,5} durant l'été 2023	17
4.4. Évolution historique des dépassements de PM _{2,5} au Québec.....	19
4.5. Répartition mensuelle des dépassements de PM _{2,5} en 2023	20
4.6. Variabilité quotidienne des concentrations de PM _{2,5} durant les épisodes de fumée	22
CHAPITRE 5 : DISCUSSION	24
5.1. Influence des feux de forêt sur les concentrations de PM _{2,5}	24
5.2. Variabilité spatiale, transport atmosphérique et évolution des épisodes de fumée	25
5.3. Dépassements des normes de qualité de l'air.....	26
5.4. Influence des conditions climatiques et caractère exceptionnel de la saison 2023	27
5.5. Impacts potentiels sur la santé publique.....	28
5.6. Limites de l'étude	29
CONCLUSION	31
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	33

LISTES DES FIGURES

Figure 1 : Répartition des périmètres des feux de forêt observés au Canada durant l'année 2023 le contour rouge met en évidence le territoire québécois (Ressources naturelles Canada, 2023)	13
Figure 2 : Localisation des stations de surveillance de la qualité de l'air utilisées pour l'analyse des concentrations de PM _{2,5} au Québec durant l'été 2023 (MELCCFP, 2023)	14
Figure 3 : Comparaison des concentrations moyennes de PM _{2,5} observées dans les stations du RSQAQ en 2022 et 2023 (MELCCFP, 2023)	15
Figure 4 : Nombre de jours selon les concentrations moyennes quotidiennes de PM _{2,5} observées dans les stations du RSQAQ du 1er juin au 31 août 2023 (MELCCFP, 2023)	17
Figure 5 : Nombre de dépassements de la norme quotidienne applicable aux particules fines (PM _{2,5}) au Québec entre 2013 et 2023 (MELCCFP, 2023)	19
Figure 6 : Nombre de dépassements de la norme quotidienne applicable aux particules fines en 2023, par mois (MELCCFP, 2023)	20
Figure 7 : Concentrations quotidiennes de PM _{2,5} à quatre stations pour les mois de juin et de juillet. Les bandes rouges représentent des dépassements de la norme quotidienne (MELCCFP, 2023)	22

LISTES DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

OMS : Organisation mondiale de la santé

MELCCFP : Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs

PM2,5 : Particules fines de diamètre inférieur ou égal à 2,5 micromètres

RSQAQ : Réseau de surveillance de la qualité de l'air du Québec

RAA : Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère

LISTES DES SYMBOLES ET DES UNITÉS

$\mu\text{g}/\text{m}^3$: Microgramme par mètre cube

% : Pourcentage

$^{\circ}\text{C}$: Degré Celsius

RÉSUMÉ

La saison des feux de forêt de 2023 a été exceptionnelle au Québec et au Canada et a entraîné une dégradation importante de la qualité de l'air dans plusieurs régions. Dans un contexte de changements climatiques, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des incendies favorise l'émission de grandes quantités de fumée et de particules fines (PM_{2,5}), reconnues pour leurs effets néfastes sur la santé humaine. Cette recherche vise à analyser l'influence des feux de forêt sur les concentrations de PM_{2,5} et sur la qualité de l'air au Québec durant l'été 2023. De manière plus spécifique, elle examine l'évolution des niveaux de PM_{2,5} pendant les épisodes de fumée, les dépassements des normes de qualité de l'air associé aux incendies ainsi que les principaux impacts sanitaires liés à l'exposition aux particules fines. La méthodologie repose sur une analyse documentaire fondée sur des articles scientifiques récents et des rapports gouvernementaux, complétée par l'analyse des données du Réseau de surveillance de la qualité de l'air du Québec. Les résultats montrent que les feux de forêt ont fortement contribué à l'augmentation des concentrations de PM_{2,5} et à la dégradation de la qualité de l'air dans plusieurs régions de la province, particulièrement dans le Nord-du-Québec et l'ouest du territoire. Les concentrations observées en 2023 étaient largement supérieures à celles des années précédentes et ont entraîné un nombre important de dépassements de la norme quotidienne québécoise. Au total, 333 dépassements ont été recensés en 2023, dont près de 89 % durant les mois de juin et juillet. Les résultats mettent également en évidence l'importance du transport des fumées sur de longues distances ainsi que les risques sanitaires associés à l'exposition aux PM_{2,5}, notamment sur les systèmes respiratoires et cardiovasculaires. Cet essai confirme que les feux de forêt constituent aujourd'hui une source majeure de PM_{2,5} au Québec et qu'ils exercent une influence importante sur la qualité de l'air.

Mots-clés : feux de forêt, PM_{2,5}, qualité de l'air, pollution atmosphérique, Québec, changements climatiques, santé publique.

INTRODUCTION

La pollution atmosphérique représente aujourd’hui un enjeu environnemental et sanitaire majeur. Selon l’Organisation mondiale de la santé, elle constitue l’une des principales menaces environnementales pour la santé humaine et serait responsable chaque année de millions de décès prématurés à l’échelle mondiale (OMS, 2021). Parmi les polluants atmosphériques les plus préoccupants, les particules fines PM_{2,5} occupent une place importante en raison de leurs effets sur la santé humaine (OMS, 2021 ; Santé Canada, 2023). Selon Santé Canada, il n’existe pas de seuil d’exposition complètement sécuritaire aux PM_{2,5} puisque toute augmentation des concentrations peut entraîner une hausse des risques pour la santé (Santé Canada, 2023 ; MELCCFP, 2023).

Au Canada, les PM_{2,5} proviennent de plusieurs sources, notamment du transport, de l’industrie, du chauffage résidentiel au bois et des feux de forêt (Environnement et Changement climatique Canada, 2017). Les feux de forêt représentent une source importante de particules fines puisqu’ils émettent de grandes quantités de fumée et de contaminants atmosphériques, dont les PM_{2,5} (Agence de la santé publique du Canada, 2023 ; Wang et al., 2024). Ces particules peuvent être transportées sur de longues distances et affecter des régions éloignées des foyers d’incendie (Agence de la santé publique du Canada, 2023 ; Wang et al., 2024).

Au Québec, les feux de forêt font partie de la dynamique naturelle des écosystèmes boréaux. Toutefois, les changements climatiques favorisent des saisons de feux plus longues, plus fréquentes et plus intenses, particulièrement dans les régions nordiques de la province (Ouranos, 2017 ; Agence de la santé publique du Canada, 2023 ; Boulanger et al., 2025).

La saison des feux de forêt de 2023 a été exceptionnelle au Canada et au Québec. Plus de 6 600 incendies ont été recensés au Canada et environ 18,4 millions d’hectares ont brûlé, soit près de 2,5 fois le précédent record historique canadien (MELCCFP, 2023). Le Québec a été la province la plus touchée avec environ 5 millions d’hectares brûlés (MELCCFP, 2023). Ces conditions ont favorisé l’émission massive de fumée et de polluants atmosphériques dans plusieurs régions du pays (Boulanger et al., 2025 ; Wang et al., 2024).

Les feux de forêt de 2023 ont entraîné une augmentation importante des concentrations de PM_{2,5} dans plusieurs régions du Québec et contribué à la dégradation de la qualité de l’air (MELCCFP, 2023 ; Boulanger

et al., 2025). Les panaches de fumée ont également affecté certaines régions des États-Unis et de l'Europe (MELCCFP, 2023 ; Wang et al., 2024).

Dans ce contexte, la surveillance de la qualité de l'air devient essentielle. Au Québec, le Réseau de surveillance de la qualité de l'air du Québec (RSQAQ) permet de suivre les concentrations de plusieurs contaminants atmosphériques, dont les PM_{2,5}, et d'évaluer les variations spatiales et temporelles de la pollution atmosphérique (MELCCFP, 2024). En 2023, le RSQAQ et le Réseau de surveillance de la qualité de l'air de Montréal comptaient 50 stations mesurant les PM_{2,5} en continu, ce qui a permis de documenter l'ampleur des épisodes de fumée liés aux feux de forêt (MELCCFP, 2025).

Ainsi, les feux de forêt de 2023 constituent un cas particulièrement pertinent pour analyser l'influence des incendies sur les concentrations de PM_{2,5} et sur la dégradation de la qualité de l'air au Québec. Cet essai vise donc à déterminer dans quelle mesure les feux de forêt ont contribué à l'augmentation des concentrations de PM_{2,5} durant l'été 2023, à analyser l'influence des épisodes de fumée sur la qualité de l'air au Québec ainsi qu'à discuter des impacts environnementaux et sanitaires associés à ces événements extrêmes.

CHAPITRE 1 : REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Les feux de forêt au Québec

Les feux de forêt font partie des processus naturels présents dans les écosystèmes forestiers du Canada depuis plusieurs siècles. Toutefois, plusieurs études montrent qu'une augmentation de la fréquence, de l'intensité et de la durée des incendies est observée depuis les dernières décennies en raison des changements climatiques et des conditions météorologiques extrêmes qui y sont associées (Jain et al., 2024). Le Québec possède l'un des plus vastes territoires forestiers du Canada, principalement composé de forêt boréale, un milieu particulièrement vulnérable aux incendies lors des périodes de sécheresse, de chaleur intense et de vents importants (Boulanger et al., 2025). Cette évolution suggère que les feux de forêt ne constituent plus uniquement un processus écologique naturel, mais également un phénomène dont l'ampleur est de plus en plus influencée par les changements environnementaux observés à l'échelle régionale et mondiale (Jain et al., 2024 ; Boulanger et al., 2025).

La saison des feux de forêt de 2023 a marqué un tournant majeur dans l'histoire environnementale du Québec et du Canada. Plus de 15 millions d'hectares ont brûlé à l'échelle canadienne, soit la plus importante superficie brûlée jamais enregistrée au pays (Jain et al., 2024). Au Québec seulement, les incendies ont touché environ 4,5 millions d'hectares, ce qui représente près du double du précédent record historique observé en 1989 (Boulanger et al., 2025). Cette saison exceptionnelle s'est également caractérisée par des émissions sans précédent de fumée et de particules fines à l'échelle continentale (Zhang et al., 2025). Ces données illustrent l'ampleur exceptionnelle de la saison 2023 et confirment que les feux de forêt peuvent désormais produire des impacts dépassant largement les variations observées lors des saisons antérieures.

Les études récentes soulignent que les conditions climatiques observées en 2023 ont fortement contribué à l'intensification des incendies. Les températures élevées, le déficit de précipitations, la fonte précoce du couvert neigeux ainsi que les épisodes de sécheresse ont favorisé la propagation rapide des feux, particulièrement dans les régions nordiques et nord-ouest du Québec (Boulanger et al., 2025 ; Jain et al., 2024). Cette situation s'inscrit dans une tendance plus large associée aux changements climatiques, qui favorisent des saisons de feux plus longues, une plus grande inflammabilité des combustibles forestiers et une augmentation des superficies brûlées (Boulanger et al., 2025). Ces résultats suggèrent que les

changements climatiques n'agissent pas seulement sur la fréquence des incendies, mais également sur leur intensité et leur capacité à affecter de vastes territoires en peu de temps. Les projections indiquent d'ailleurs que les superficies brûlées annuellement au Québec pourraient augmenter de trois à cinq fois d'ici la fin du XXI^e siècle si les tendances actuelles se maintiennent (Boulanger et al., 2025).

Au-delà des superficies brûlées, les incendies de 2023 ont entraîné d'importantes conséquences environnementales et sociales. Les feux ont provoqué des pertes de couvert forestier, perturbé la régénération naturelle de certains écosystèmes et affecté la biodiversité de plusieurs secteurs boréaux (Jain et al., 2024 ; Boulanger et al., 2025). Les impacts ont également touché les populations humaines, notamment par l'évacuation de plus de 38 700 personnes et par les menaces exercées sur certaines infrastructures essentielles dans les régions nordiques du Québec (Boulanger et al., 2025). Bien que ces conséquences aient été particulièrement importantes dans les zones directement touchées par les incendies, plusieurs études indiquent que les effets des feux de forêt se sont également manifestés à grande distance par l'intermédiaire de la pollution atmosphérique associée aux panaches de fumée (Zhang et al., 2025).

Les feux de forêt représentent également une source importante de pollution atmosphérique. Les épisodes de fumée observés en 2023 ont dépassé largement l'échelle locale, affectant non seulement le Canada, mais aussi plusieurs régions des États-Unis et de l'Europe en raison du transport atmosphérique à longue distance (Zhang et al., 2025). Parmi les polluants émis, les particules fines PM_{2,5} occupent une place importante en raison de leur forte concentration dans la fumée des incendies forestiers (Agence de la santé publique du Canada, 2023). Les incendies canadiens de 2023 ont augmenté l'exposition annuelle moyenne aux PM_{2,5} de 3,82 µg/m³ au Canada et de 1,49 µg/m³ aux États-Unis, démontrant l'importance croissante des feux de forêt comme source majeure de pollution atmosphérique (Zhang et al., 2025). Ces observations montrent que les conséquences des incendies forestiers ne se limitent pas aux territoires brûlés, mais peuvent également affecter la qualité de l'air et l'exposition des populations sur de très vastes distances.

Dans ce contexte, les travaux récents mettent en évidence l'importance croissante des feux de forêt comme source de PM_{2,5} au Canada et soulignent leurs répercussions potentielles sur la qualité de l'air. L'ampleur exceptionnelle de la saison 2023 illustre ainsi la nécessité de mieux comprendre l'influence des feux de forêt sur les concentrations de PM_{2,5} et la qualité de l'air au Québec.

1.2 Les particules fines PM2.5 et la qualité de l'air

Les PM_{2,5} occupent une place importante dans l'étude de la qualité de l'air puisqu'elles constituent l'un des polluants atmosphériques les plus préoccupants pour la santé humaine. Au Canada et au Québec, les feux de forêt représentent une source importante de ces particules fines et contribuent à la détérioration de la qualité de l'air (Jain et al., 2024). Dans un contexte de changements climatiques, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des feux de forêt pourrait accroître l'exposition des populations à ces particules et amplifier leurs effets sur la santé et l'environnement.

La qualité de l'air est étroitement liée à la présence de polluants atmosphériques susceptibles d'affecter la santé humaine et l'environnement. Parmi les principaux polluants utilisés pour son évaluation figurent les particules fines, l'ozone, le dioxyde d'azote et le dioxyde de soufre (Manisalidis et al., 2020). Toutefois, les risques associés à ces contaminants varient selon leur concentration, la durée d'exposition et la vulnérabilité des populations exposées, ce qui complexifie l'évaluation de leurs impacts.

Au Québec, les concentrations de PM_{2,5} sont encadrées par le Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère (RAA), qui fixe une norme maximale de 30 µg/m³ pour les concentrations moyennes sur une période de 24 heures. Cette norme constitue une référence importante pour l'évaluation de la qualité de l'air, particulièrement lors des épisodes de fumée liés aux feux de forêt où les concentrations peuvent dépasser les seuils réglementaires.

Les PM_{2,5} sont des particules atmosphériques dont le diamètre est inférieur ou égal à 2,5 micromètres. Leur petite taille leur permet de pénétrer profondément dans les poumons et d'atteindre la circulation sanguine (Shin et al., 2024). Cette capacité de pénétration explique en partie pourquoi les PM_{2,5} sont considérées comme l'un des polluants atmosphériques les plus préoccupants pour la santé humaine.

Les PM_{2,5} proviennent de sources naturelles et anthropiques variées, notamment les transports, les activités industrielles, le chauffage résidentiel, la cuisson, la fumée de cigarette et les feux de forêt (Shin et al., 2024 ; Lim et al., 2022). Cette diversité des sources complique leur contrôle et favorise des expositions provenant à la fois de l'environnement extérieur et intérieur. Les concentrations de PM_{2,5} sont également influencées par les activités humaines, comme l'a montré la diminution observée dans plusieurs villes canadiennes durant les confinements liés à la COVID-19 (Ashraf et al., 2025). Dans le cas des feux de forêt,

la gestion de cette pollution devient encore plus complexe puisque les particules peuvent être transportées sur de longues distances et affecter des régions éloignées des zones de combustion (MELCCFP, 2024).

Les PM_{2,5} ne présentent pas toutes le même niveau de dangerosité, puisque leurs effets dépendent notamment de leur composition chimique. Certaines particules peuvent contenir des métaux, du soufre, du carbone ou d'autres composés toxiques susceptibles d'augmenter leur potentiel oxydatif et leurs effets sur la santé (Weichenthal et al., 2021). Leur composition varie également selon leur source d'émission et les conditions de combustion, ce qui signifie que deux concentrations similaires de PM_{2,5} peuvent entraîner des impacts sanitaires différents (Rangel-Alvarado et al., 2022). Ces observations montrent que l'évaluation des risques associés aux PM_{2,5} ne dépend pas uniquement de leur concentration, mais également de leurs caractéristiques chimiques.

Les PM_{2,5} peuvent affecter plusieurs systèmes biologiques, notamment les systèmes respiratoire, cardiovasculaire, immunitaire et neurologique. Les principaux mécanismes associés à ces effets incluent le stress oxydatif, l'inflammation pulmonaire, l'inflammation systémique et diverses perturbations cellulaires, qui peuvent contribuer au développement ou à l'aggravation de plusieurs maladies chroniques (Shin et al., 2024 ; Zhao et al., 2020). Les effets observés ne se limitent pas au système respiratoire. Une exposition élevée ou prolongée aux PM_{2,5} est associée à une aggravation des symptômes respiratoires et à une augmentation des hospitalisations, particulièrement lors des épisodes de fumée liés aux feux de forêt (Aguilera et al., 2021). Des effets cardiovasculaires, tels qu'une hausse du risque de maladies coronariennes, d'accidents vasculaires cérébraux et de mortalité cardiovasculaire, ont également été rapportés (Bai et al., 2024). Plusieurs études suggèrent aussi des effets sur le système nerveux, notamment une augmentation du risque de maladie d'Alzheimer et une diminution des fonctions cognitives, bien que certains mécanismes demeurent encore à l'étude (Yang et al., 2022 ; Yitshak-Sade et al., 2021). L'ensemble de ces résultats suggère que les PM_{2,5} constituent un facteur de risque systémique pouvant affecter simultanément plusieurs fonctions biologiques, au-delà des seuls effets respiratoires traditionnellement associés à la pollution atmosphérique.

Les conséquences sanitaires des PM_{2,5} ne touchent toutefois pas toutes les populations de la même manière. Les personnes âgées, les enfants, les femmes enceintes ainsi que les individus atteints de maladies respiratoires, cardiovasculaires ou neurologiques présentent généralement une plus grande vulnérabilité à cette pollution (Shin et al., 2024 ; Buteau et al., 2023). Les effets peuvent également

apparaître à la suite d'expositions de courte durée à des concentrations élevées de particules fines, entraînant une augmentation des hospitalisations et une aggravation rapide de certains problèmes respiratoires ou cardiovasculaires (Yitshak-Sade et al., 2021 ; Beilstein et al., 2026). Ces observations montrent que les impacts sanitaires des PM_{2,5} peuvent survenir aussi bien lors d'expositions chroniques que lors d'épisodes ponctuels de pollution atmosphérique.

Lors des épisodes de fumée de biomasse associés aux feux de forêt, les concentrations de PM_{2,5} peuvent augmenter fortement et entraîner des épisodes prolongés de pollution atmosphérique. Au Canada, cet enjeu est particulièrement préoccupant en raison de l'étendue du territoire forestier et de l'influence des changements climatiques, qui favorisent des feux plus fréquents, plus longs et plus intenses (Paul et al., 2022). Cette situation souligne l'importance croissante des incendies forestiers comme source de pollution atmosphérique et comme enjeu de santé publique dans plusieurs régions canadiennes, notamment au Québec.

L'évaluation de l'exposition aux PM_{2,5} demeure toutefois complexe. Les concentrations peuvent varier selon les conditions météorologiques, les saisons, les régions et les sources d'émission, tandis que les stations de surveillance ne couvrent pas toujours les territoires éloignés. Les modèles combinant les données satellitaires, les mesures au sol et les données météorologiques permettent d'améliorer l'estimation de l'exposition, mais comportent encore certaines limites, particulièrement lors des épisodes extrêmes de feux de forêt (Paul et al., 2022 ; Raza et al., 2026). Cette incertitude méthodologique peut influencer l'évaluation des effets sanitaires associés aux PM_{2,5}.

Malgré ces limites, les études récentes montrent que les effets sanitaires des PM_{2,5} peuvent être observés même à de faibles concentrations. Ces résultats remettent en question l'existence d'un seuil totalement sécuritaire d'exposition et suggèrent qu'une part importante de la population peut être affectée, même lorsque les concentrations demeurent relativement modérées (Raza et al., 2026 ; Yang et al., 2022). Ainsi, les enjeux associés aux PM_{2,5} concernent non seulement les épisodes extrêmes de pollution, mais également les expositions quotidiennes répétées pouvant entraîner des effets cumulatifs sur la santé.

CHAPITRE 2 : PROBLÉMATIQUE

Les particules fines PM_{2,5} figurent parmi les polluants atmosphériques les plus préoccupants pour la santé humaine en raison de leur capacité à pénétrer profondément dans l'organisme. Leur exposition est associée à plusieurs effets sanitaires, notamment des maladies respiratoires, cardiovasculaires et certains troubles neurologiques (Shin et al., 2026 ; Ripley et al., 2024). Dans un contexte marqué par les changements climatiques, la présence croissante de ces particules dans l'air soulève d'importantes préoccupations pour la santé publique.

Les changements climatiques contribuent à l'augmentation de plusieurs événements extrêmes, notamment les sécheresses et les feux de forêt. Au Canada, les feux de forêt deviennent plus fréquents, plus longs et parfois plus intenses, ce qui favorise l'émission de grandes quantités de fumée et de polluants atmosphériques, particulièrement les PM_{2,5}. La fumée des feux peut dégrader fortement la qualité de l'air et affecter des populations situées même à grande distance des zones incendiées en raison du transport atmosphérique des polluants (Matz et al., 2020). Cette situation accentue les préoccupations liées aux effets des feux de forêt sur la qualité de l'air et la santé des populations.

L'exposition aux PM_{2,5} issues des feux de forêt est associée à une augmentation des hospitalisations respiratoires, des visites à l'urgence et des décès prématurés (Matz et al., 2020). Certaines populations, notamment les enfants, les personnes âgées et les individus souffrant déjà de maladies respiratoires ou cardiovasculaires, présentent une vulnérabilité plus importante face à cette pollution atmosphérique (Mullen et al., 2020 ; Shin et al., 2026).

Le Québec illustre particulièrement bien cette problématique. Durant l'été 2023, les épisodes de fumée liés aux feux de forêt ont entraîné des concentrations historiques de PM_{2,5} ainsi qu'un nombre important de dépassements des normes de qualité de l'air dans plusieurs régions de la province (MELCCFP, 2024). Bien que plusieurs incendies se soient produits dans des régions éloignées, les fumées ont affecté une grande partie du territoire québécois, démontrant l'importance du transport atmosphérique des particules fines. Cette situation a soulevé des préoccupations importantes concernant les impacts environnementaux et sanitaires associés aux épisodes de fumée au Québec.

Malgré les avancées scientifiques sur les PM_{2,5} et leurs effets sanitaires, plusieurs limites demeurent dans la compréhension des impacts de la pollution atmosphérique. Certaines études soulignent encore des difficultés liées à l'évaluation précise de l'exposition des populations ainsi qu'à la compréhension des mécanismes et des facteurs pouvant modifier les effets sanitaires associés aux PM_{2,5} (Gaspard et al., 2025 ; Shin et al., 2026). Dans un contexte marqué par l'intensification des saisons de feux au Canada, il devient donc essentiel de mieux comprendre l'influence des feux de forêt sur les concentrations de PM_{2,5} ainsi que leurs effets sur la qualité de l'air et la santé publique au Québec.

Objectif général

Analyser l'influence des feux de forêt sur les concentrations de PM_{2,5} et la dégradation de la qualité de l'air au Québec.

Objectifs spécifiques

- ✓ Examiner l'évolution des concentrations de PM_{2,5} durant les épisodes de feux de forêt.
- ✓ Analyser les dépassements des normes de qualité de l'air associés aux fumées de feux.
- ✓ Identifier les principaux impacts sanitaires associés à l'exposition aux PM_{2,5}.

Question de recherche

Dans quelle mesure les feux de forêt influencent-ils les concentrations de PM_{2,5} et la dégradation de la qualité de l'air au Québec ?

Hypothèse

Les épisodes de feux de forêt entraîneraient une augmentation importante des concentrations de PM_{2,5} au Québec, contribuant à une dégradation significative de la qualité de l'air ainsi qu'à une hausse des impacts sanitaires associés à l'exposition aux particules fines.

CHAPITRE 3 : MÉTHODOLOGIE

Cette étude repose sur une approche documentaire, comparative et analytique visant à examiner l'influence des feux de forêt sur les concentrations de PM_{2,5} et la qualité de l'air au Québec durant l'été 2023. La méthodologie combine une revue de littérature scientifique récente ainsi qu'une analyse de données environnementales provenant de sources gouvernementales officielles.

La première étape de l'étude a consisté à effectuer une recherche documentaire portant sur les feux de forêt, les particules fines PM_{2,5}, la qualité de l'air et les impacts sanitaires associés à la fumée des incendies. Les recherches bibliographiques ont été réalisées à partir de différentes plateformes et bases de données scientifiques reconnues, notamment Google Scholar, ScienceDirect, Nature ainsi que la plateforme documentaire Sofia de la bibliothèque de l'UQAM, qui a constitué la principale source de recherche utilisée dans le cadre de cette étude. Environ 70 % des articles scientifiques retenus proviennent de cette plateforme, puisqu'elle donne accès à plusieurs revues scientifiques spécialisées dans les domaines de l'environnement, de la santé publique et de la qualité de l'air. Plusieurs articles consultés étaient également publiés par Elsevier et d'autres revues scientifiques internationales reconnues.

Les recherches ont été effectuées à l'aide de différents mots-clés en français et en anglais afin d'élargir la portée documentaire et d'obtenir des études scientifiques récentes et pertinentes. Parmi les principaux mots-clés utilisés figurent notamment : « feux de forêt », « PM_{2,5} », « qualité de l'air », « fumée des incendies », « wildfire smoke », « forest fires 2023 », « air quality », « particulate matter », « public health », « Québec » et « Canada ». Certains passages d'articles scientifiques publiés en anglais ont été traduits à l'aide de la plateforme Online Doc Translator afin de faciliter la compréhension, l'analyse et l'interprétation des données scientifiques.

Afin d'assurer la pertinence scientifique et l'actualité des informations utilisées, plusieurs critères de sélection ont été appliqués. Les recherches ont principalement été filtrées entre 2020 et 2026 afin de privilégier les études récentes portant sur les feux de forêt de 2023 au Canada. Une attention particulière a été accordée aux études réalisées au Québec et au Canada afin de conserver un lien direct avec le contexte environnemental analysé dans cet essai. Quelques références plus anciennes ont toutefois été

conservées lorsqu'elles permettaient d'expliquer certains concepts théoriques importants liés aux PM_{2,5}, à la pollution atmosphérique ou aux effets sanitaires associés à l'exposition aux particules fines.

La recherche documentaire a permis d'identifier environ 100 articles scientifiques. Une première sélection a été réalisée à partir des titres, des résumés et des conclusions des publications afin d'évaluer leur pertinence par rapport aux objectifs de l'étude. Seuls les articles les plus directement liés aux feux de forêt, aux concentrations de PM_{2,5}, au transport atmosphérique des fumées ainsi qu'aux impacts sanitaires sur la population ont finalement été retenus. Les articles sélectionnés provenaient principalement de revues scientifiques évaluées par les pairs et reconnues dans les domaines de l'environnement, de la santé publique et de la qualité de l'air.

L'analyse des résultats repose principalement sur les données du Réseau de surveillance de la qualité de l'air du Québec (RSQAQ) publiées par le MELCCFP. Les concentrations de PM_{2,5} observées dans différentes stations de surveillance réparties sur le territoire québécois ont été utilisées afin d'évaluer l'évolution spatiale et temporelle de la pollution atmosphérique durant l'été 2023. Les données analysées incluent notamment les concentrations moyennes de PM_{2,5} et les dépassements du seuil quotidien de 30 µg/m³ ainsi que la variabilité quotidienne des concentrations observées entre juin et août 2023. L'interprétation des résultats s'appuie sur les normes établies dans le Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère (RAA) du Québec, qui fixe une norme quotidienne de 30 µg/m³ pour les particules fines PM_{2,5}. Les concentrations observées dans les différentes stations ont donc été comparées à ce seuil réglementaire afin d'évaluer l'importance des épisodes de pollution atmosphérique associés aux feux de forêt de 2023.

Une approche comparative a également été utilisée afin de comparer les concentrations de PM_{2,5} observées en 2023 avec celles des années précédentes afin de mieux mettre en évidence le caractère exceptionnel des épisodes de fumée associés aux feux de forêt de 2023. L'analyse des figures et des données gouvernementales a ensuite permis d'interpréter les variations régionales des concentrations de PM_{2,5} en fonction de la localisation des incendies, du transport atmosphérique des fumées et des conditions climatiques observées durant cette période.

Finalement, les résultats obtenus ont été comparés et discutés à la lumière de la littérature scientifique récente afin d'évaluer la cohérence entre les données observées au Québec et les connaissances actuelles sur les impacts des feux de forêt sur la qualité de l'air et la santé publique. Cette démarche a permis d'appuyer l'interprétation des résultats tout en identifiant certaines limites méthodologiques liées

notamment à la couverture spatiale des stations de surveillance, à l'absence d'analyses chimiques détaillées des particules et à la difficulté d'évaluer précisément l'exposition réelle des populations.

Une révision linguistique du document a également été effectuée à l'aide du logiciel Antidote afin de corriger les erreurs d'orthographe, de grammaire, de syntaxe et de ponctuation.

CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET ANALYSE

L'année 2023 a été marquée par une saison exceptionnelle de feux de forêt au Canada. Plus de 6 600 incendies ont été recensés à travers le pays, représentant environ 18,4 millions d'hectares brûlés, soit près de 2,5 fois le précédent record historique observé en 1989. Le Québec figure parmi les provinces les plus touchées, particulièrement dans les régions nordiques et nord-ouest de la province (MELCCFP, 2023).

4.1. Répartition spatiale des feux de forêt et station de surveillance

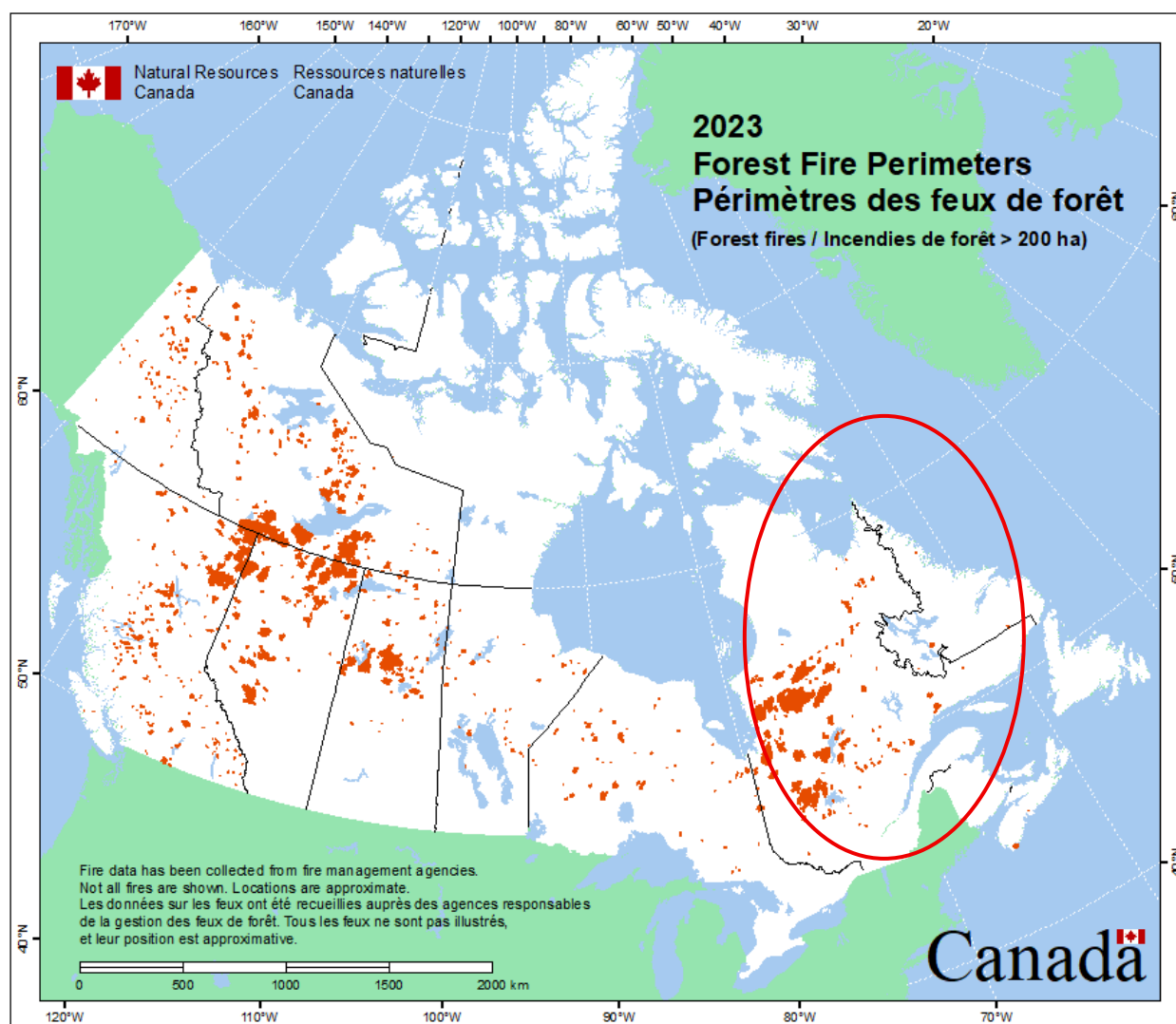


Figure 1 : Répartition des périmètres des feux de forêt observés au Canada durant l'année 2023 le contour rouge met en évidence le territoire québécois (Ressources naturelles Canada, 2023)

La figure 1 met en évidence une forte concentration des feux de forêt dans plusieurs régions du Canada durant l'année 2023, particulièrement dans l'ouest du pays ainsi que dans certaines zones du Québec. Plusieurs périmètres importants sont observés dans les secteurs nordiques québécois, secteurs qui correspondent également à certaines stations ayant enregistré des concentrations élevées de PM_{2,5} durant l'été 2023. Cette distribution spatiale suggère que les feux de forêt ont fortement contribué à la dégradation de la qualité de l'air observée dans plusieurs régions du Québec.

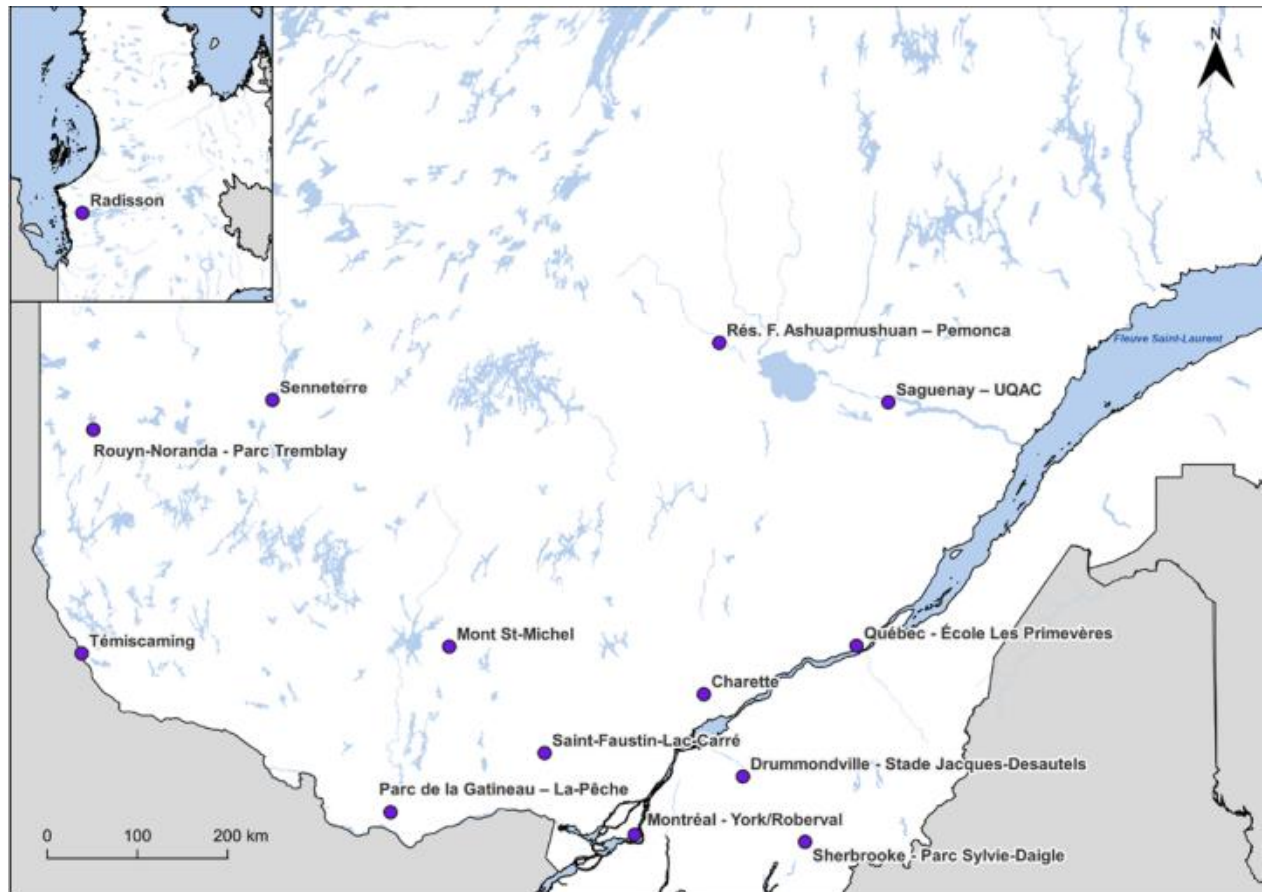


Figure 2 : Localisation des stations de surveillance de la qualité de l'air utilisées pour l'analyse des concentrations de PM_{2,5} au Québec durant l'été 2023 (MELCCFP, 2023)

La figure 2 montre que les stations de surveillance sont réparties dans plusieurs régions du Québec, incluant des secteurs urbains et nordiques. Cette répartition géographique permet d'observer les variations des concentrations de PM_{2,5} selon les régions étudiées et d'évaluer l'influence des feux de forêt sur la qualité de l'air dans différents contextes territoriaux. La présence de stations dans des régions situées à

proximité des principaux foyers d'incendie permet également de mieux analyser l'impact potentiel des panaches de fumée sur les concentrations de particules fines observées durant l'été 2023 (MELCCFP, 2023).

4.2. Comparaison des concentrations de PM_{2,5} entre 2022 et 2023

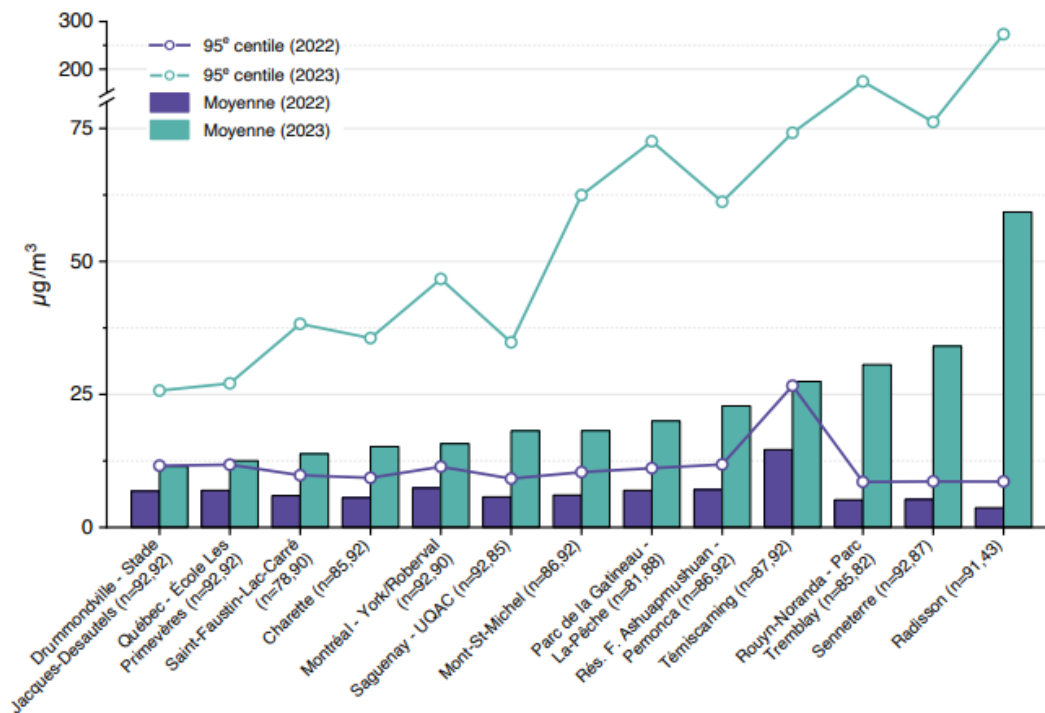


Figure 3 : Comparaison des concentrations moyennes de PM_{2,5} observées dans les stations du RSQAQ en 2022 et 2023 (MELCCFP, 2023)

La figure 3 met en évidence une augmentation importante des concentrations de PM_{2,5} dans la majorité des stations du RSQAQ en 2023 comparativement à 2022. Alors que les concentrations observées en 2022 demeuraient généralement faibles et relativement stables entre les différentes stations, les données de 2023 montrent une hausse marquée des concentrations moyennes ainsi qu'une augmentation importante des valeurs du 95e centile. Cette différence suggère que les épisodes de fumée associés aux feux de forêt ont fortement contribué à la dégradation de la qualité de l'air au Québec durant l'été 2023.

Les augmentations les plus importantes sont observées dans les stations situées dans les régions nordiques et nord-ouest du Québec. La station Radisson présente la hausse la plus marquée, avec une concentration

moyenne passant de 3,68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2022 à 53,83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2023. Les valeurs du 95e centile y atteignent également près de 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ce qui traduit la présence de plusieurs épisodes de pollution atmosphérique particulièrement intenses durant l'été 2023. Cette situation peut s'expliquer par la proximité de cette station avec plusieurs incendies majeurs ayant affecté le Nord-du-Québec (MELCCFP, 2023).

Les stations Senneterre, Rouyn-Noranda, Témiscaming et Parc de la Gatineau présentent également des augmentations importantes des concentrations moyennes et des valeurs du 95e centile comparativement à 2022. L'augmentation observée du 95e centile montre que les concentrations élevées ne correspondaient pas seulement à une hausse moyenne des $\text{PM}_{2,5}$, mais également à des épisodes ponctuels de pollution beaucoup plus sévères. Ces variations importantes suggèrent que les panaches de fumée liés aux feux de forêt ont entraîné des fluctuations rapides et importantes des concentrations de $\text{PM}_{2,5}$ dans plusieurs régions du Québec.

À l'inverse, certaines stations situées plus au sud, comme Drummondville, Québec et Saint-Faustin-Lac-Carré, présentent des augmentations plus modérées. Cette différence suggère que l'influence des feux de forêt variait selon la localisation géographique des stations, la distance par rapport aux principaux foyers d'incendie ainsi que les conditions de transport atmosphérique des fumées.

Dans l'ensemble, les données de 2023 montrent des concentrations de $\text{PM}_{2,5}$ largement supérieures à celles observées en 2022 dans la majorité des stations étudiées. Les écarts particulièrement élevés observés dans certaines régions démontrent le caractère exceptionnel des épisodes de fumée de l'été 2023 et confirment l'influence importante des feux de forêt sur la dégradation de la qualité de l'air au Québec.

4.3. Dépassements de la norme quotidienne des PM_{2,5} durant l'été 2023

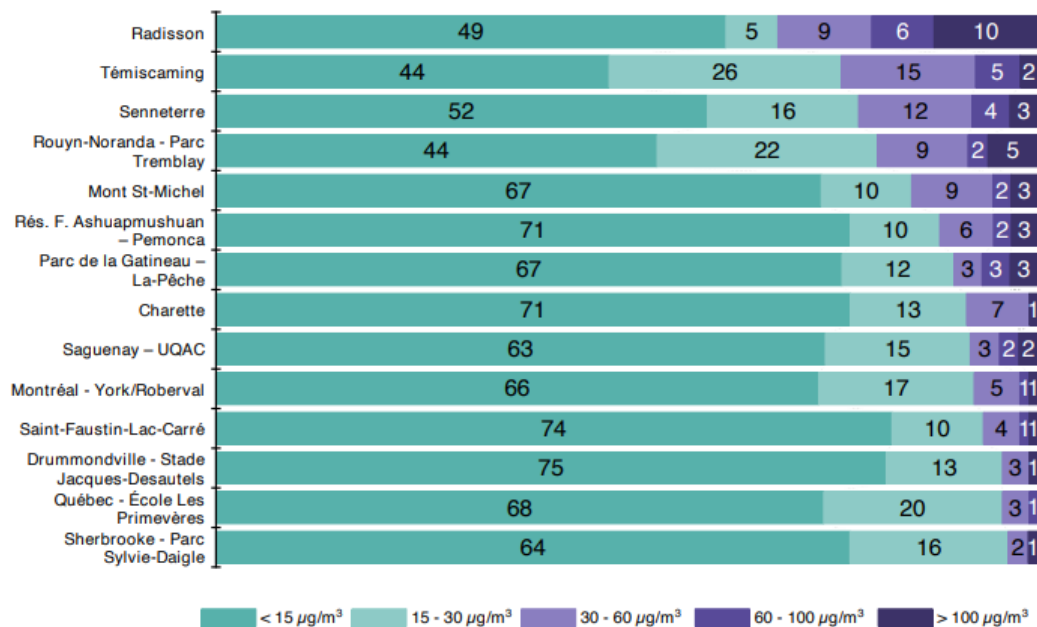


Figure 4 : Nombre de jours selon les concentrations moyennes quotidiennes de PM_{2,5} observées dans les stations du RSQAQ du 1er juin au 31 août 2023 (MELCCFP, 2023)

La figure 4 présente le nombre de jours durant lesquels les concentrations moyennes quotidiennes de PM_{2,5} observées dans différentes stations du RSQAQ ont atteint différents intervalles de concentration entre le 1er juin et le 31 août 2023. Selon le Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère, la norme quotidienne des PM_{2,5} est fixée à 30 µg/m³ sur une période de 24 heures. Les concentrations supérieures à cette valeur correspondent donc aux journées de dépassement de la norme québécoise.

Les résultats montrent que les dépassements de la norme ont été particulièrement importants dans plusieurs stations situées dans les régions nordiques et nord-ouest du Québec. La station Radisson présente le nombre le plus élevé de journées de dépassement, avec un total de 25 jours au-dessus de 30 µg/m³, incluant 10 journées comprises entre 60 et 100 µg/m³ ainsi que 6 journées dépassant 100 µg/m³. Les stations Témiscaming, Senneterre et Rouyn-Noranda présentent également des niveaux élevés de pollution atmosphérique avec respectivement 22, 19 et 16 jours de dépassement de la norme quotidienne.

La distribution des concentrations observées montre également que certaines régions ont connu des épisodes de pollution particulièrement sévères. À Radisson, Senneterre et Témiscaming, une proportion

importante des journées se situe dans les catégories supérieures à $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ce qui traduit des épisodes intenses de fumée liés aux feux de forêt. Ces concentrations demeurent largement supérieures à la norme québécoise et reflètent une dégradation importante de la qualité de l'air durant plusieurs journées consécutives. La présence de journées dépassant $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dans certaines stations montre également que les épisodes de fumée observés durant l'été 2023 ont atteint des niveaux rarement enregistrés auparavant dans plusieurs régions du Québec (MELCCFP, 2023).

À l'inverse, les stations situées plus au sud du Québec, notamment Sherbrooke, Québec et Drummondville, présentent un nombre beaucoup plus faible de dépassements, généralement limité à trois ou quatre journées. Dans ces stations, la majorité des journées demeurent dans les catégories inférieures à $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Cette différence importante entre les régions suggère que l'influence des feux de forêt sur les concentrations de $\text{PM}_{2,5}$ variait fortement selon la localisation géographique des stations ainsi que leur proximité avec les principaux foyers d'incendie.

Les stations les plus touchées correspondent principalement aux régions ayant connu les incendies les plus importants durant l'été 2023, notamment dans le Nord-du-Québec et autour de Lebel-sur-Quévillon (MELCCFP, 2023). Cette répartition spatiale suggère que la proximité des incendies ainsi que le transport des panaches de fumée ont fortement influencé l'intensité des concentrations observées dans certaines régions du Québec.

Plusieurs stations ont également enregistré un nombre de dépassements rarement observé auparavant. Avant l'été 2023, la station Radisson n'avait enregistré aucun dépassement de la norme quotidienne depuis son ouverture en 2017 (MELCCFP, 2023). Les stations Témiscaming, Senneterre et Rouyn-Noranda présentaient également historiquement un nombre beaucoup plus faible de journées de dépassement. L'ensemble de ces résultats démontre donc le caractère exceptionnel des épisodes de fumée de l'été 2023 et confirme l'influence importante des feux de forêt sur la dégradation de la qualité de l'air au Québec.

4.4. Évolution historique des dépassements de PM_{2,5} au Québec

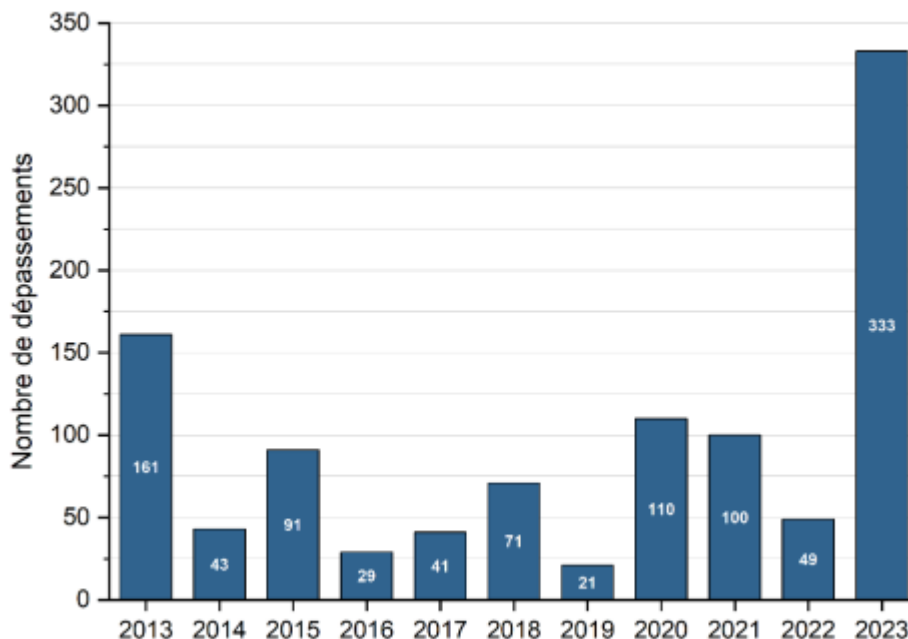


Figure 5 : Nombre de dépassements de la norme quotidienne applicable aux particules fines (PM_{2,5}) au Québec entre 2013 et 2023 (MELCCFP, 2023)

La figure 5 montre une augmentation très importante du nombre de dépassements de la norme quotidienne des PM_{2,5} au Québec en 2023 comparativement aux années précédentes. Un total de 333 dépassements a été enregistré en 2023, alors que les années antérieures présentaient généralement des valeurs beaucoup plus faibles, variant entre 21 et 161 dépassements entre 2013 et 2022. L'année 2023 représente ainsi le plus grand nombre de dépassements observé durant toute la période étudiée.

L'écart particulièrement important entre 2023 et les autres années suggèrent que les épisodes de pollution atmosphérique observés durant l'été 2023 ne correspondent pas à une simple variabilité annuelle normale de la qualité de l'air au Québec. Les concentrations élevées de PM_{2,5} observées cette année-là semblent plutôt associées à un événement exceptionnel, soit les feux de forêt majeurs ayant touché plusieurs régions du Canada et du Québec durant la période estivale (MELCCFP, 2023).

Les données montrent également que certaines années antérieures, comme 2013, 2020 et 2021, avaient déjà présenté un nombre relativement élevé de dépassements. Toutefois, les valeurs enregistrées en 2023

demeurent largement supérieures à celles observées durant ces années, ce qui démontre l'ampleur inhabituelle des épisodes de fumée associés aux incendies de forêt de 2023. Le nombre de dépassements observé en 2023 est notamment près de sept fois plus élevé qu'en 2022, année durant laquelle seulement 49 dépassements avaient été recensés.

Cette augmentation importante des dépassements illustre également la forte influence des feux de forêt sur la dégradation de la qualité de l'air à l'échelle provinciale (MELCCFP, 2023). Contrairement aux figures précédentes qui mettaient surtout en évidence des différences régionales entre les stations, cette figure montre que les épisodes de pollution observés en 2023 ont représenté un phénomène généralisé à l'échelle du Québec. Ces résultats suggèrent ainsi que les feux de forêt constituent désormais une source majeure de PM_{2,5} susceptible d'influencer significativement la qualité de l'air au Québec lors des saisons de feux intenses (MELCCFP, 2023 ; Jain et al., 2024 ; Zhang et al., 2025).

4.5. Répartition mensuelle des dépassements de PM_{2,5} en 2023

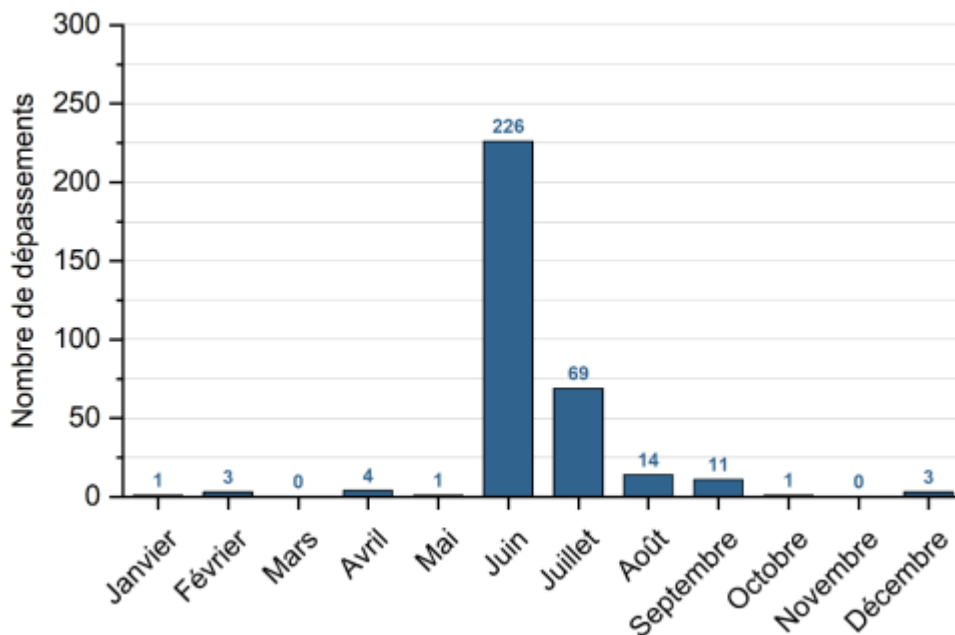


Figure 6 : Nombre de dépassements de la norme quotidienne applicable aux particules fines en 2023, par mois (MELCCFP, 2023)

La figure 6 montre que les dépassements de la norme quotidienne des PM_{2,5} observés en 2023 étaient fortement concentrés durant les mois de juin et de juillet. Le mois de juin présente à lui seul 226 dépassements, tandis que juillet en compte 69. À l'inverse, les autres mois de l'année présentent un nombre très faible de dépassements, généralement inférieur à 15.

Cette répartition temporelle suggère que la dégradation importante de la qualité de l'air observée en 2023 ne correspond pas à une pollution atmosphérique constante durant l'ensemble de l'année, mais plutôt à des épisodes ponctuels et intenses concentrés durant la saison des feux de forêt. La forte concentration des dépassements durant les mois de juin et juillet coïncide avec la période ayant connu les incendies les plus importants au Québec et au Canada durant l'été 2023 (MELCCFP, 2023).

Les résultats montrent également que les épisodes de fumée associés aux feux de forêt ont eu une influence rapide et importante sur les concentrations de PM_{2,5}. La diminution marquée du nombre de dépassements après le mois de juillet suggère que les concentrations élevées observées en 2023 étaient principalement liées aux événements de feux de forêt plutôt qu'à des sources permanentes de pollution atmosphérique.

Dans l'ensemble, cette distribution mensuelle démontre que les feux de forêt ont constitué le principal facteur responsable des épisodes extrêmes de PM_{2,5} observés au Québec en 2023. Les résultats mettent ainsi en évidence l'importance des événements ponctuels de fumée dans la dégradation de la qualité de l'air à l'échelle provinciale.

4.6. Variabilité quotidienne des concentrations de PM_{2,5} durant les épisodes de fumée

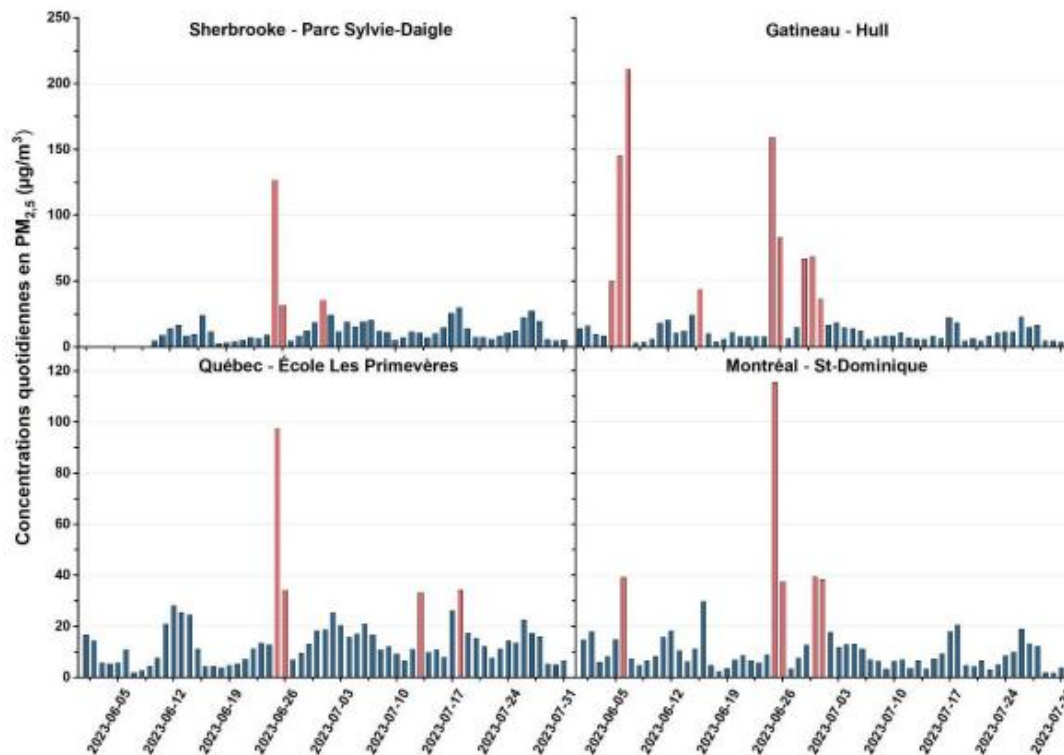


Figure 7 : Concentrations quotidiennes de PM_{2,5} à quatre stations pour les mois de juin et de juillet. Les bandes rouges représentent des dépassements de la norme quotidienne (MELCCFP, 2023)

La figure 7 montre que les concentrations quotidiennes de PM_{2,5} ont connu plusieurs épisodes de hausse rapide durant les mois de juin et juillet 2023. Certaines stations présentent des pics dépassant largement la norme quotidienne de 30 µg/m³, avec des concentrations atteignant ponctuellement des niveaux extrêmement élevés durant certaines journées de juin. Ces augmentations brusques sont suivies de diminutions rapides des concentrations, ce qui traduit une forte variabilité temporelle des épisodes de fumée.

Les pics observés apparaissent également de manière simultanée dans plusieurs stations, particulièrement durant la deuxième moitié du mois de juin. Cette synchronisation suggère une influence régionale importante des panaches de fumée issus des feux de forêt (MELCCFP, 2023), plutôt qu'une source locale isolée de pollution atmosphérique. Les épisodes de pollution observés semblent donc associés au

transport des masses d'air contaminées sur de longues distances à travers plusieurs régions du Québec (MELCCFP, 2023).

L'intensité des pics observés montre également que les épisodes de fumée de l'été 2023 ont provoqué des augmentations soudaines des concentrations de PM_{2,5} sur de courtes périodes. Contrairement aux variations habituelles de la qualité de l'air observées dans plusieurs stations, les fluctuations enregistrées durant juin et juillet 2023 présentent une amplitude beaucoup plus importante, ce qui reflète le caractère exceptionnel des événements de feux de forêt de 2023.

La figure met aussi en évidence une diminution progressive de la fréquence et de l'intensité des pics après le mois de juillet, ce qui correspond à la réduction graduelle des épisodes majeurs de feux de forêt durant la seconde moitié de l'été. L'ensemble des résultats confirme ainsi que les épisodes de fumée associés aux incendies ont fortement influencé la dynamique quotidienne des concentrations de PM_{2,5} au Québec durant l'été 2023 (MELCCFP, 2023).

CHAPITRE 5 : DISCUSSION

5.1. Influence des feux de forêt sur les concentrations de PM_{2,5}

Les résultats obtenus dans cette étude montrent une augmentation importante des concentrations de PM_{2,5} au Québec durant l'été 2023 comparativement à 2022. Cette hausse dépasse la variabilité annuelle habituellement observée et suggère une dégradation importante de la qualité de l'air associée aux épisodes de feux de forêt.

Cette interprétation concorde avec les travaux de Jain et al. (2024), Zhang et al. (2025) et Boulanger et al. (2025), qui décrivent la saison des feux de 2023 comme une perturbation environnementale majeure à l'échelle canadienne. Ces auteurs montrent que cette saison a été exceptionnelle par l'ampleur des superficies brûlées, l'intensité des incendies et les quantités importantes de fumée et de particules fines émises dans l'atmosphère. Zhang et al. (2025) indiquent également que les incendies canadiens de 2023 ont provoqué une hausse importante des concentrations de PM_{2,5} à l'échelle continentale.

L'intérêt des résultats de cette étude est donc de montrer comment cette perturbation nationale s'est traduite concrètement à l'échelle du Québec. Les fortes hausses observées dans plusieurs stations indiquent que les feux de forêt ont probablement constitué une source dominante de pollution atmosphérique durant l'été 2023. Autrement dit, les résultats ne montrent pas seulement une augmentation des PM_{2,5}, mais également une modification importante de la qualité de l'air au Québec sous l'effet d'un phénomène environnemental de grande ampleur.

Bien que les résultats soutiennent fortement l'hypothèse d'une influence majeure des feux de forêt sur les concentrations de PM_{2,5}, certaines limites doivent être considérées. L'absence d'analyses chimiques détaillées ne permet pas d'attribuer avec certitude chaque hausse observée uniquement aux feux de forêt. D'autres sources locales, comme les activités industrielles, le chauffage résidentiel ou le transport routier, ont également pu contribuer ponctuellement aux concentrations mesurées.

5.2. Variabilité spatiale, transport atmosphérique et évolution des épisodes de fumée

Les concentrations les plus élevées observées dans les stations de Radisson, Senneterre et Témiscaming indiquent que les impacts des feux de forêt ont été particulièrement marqués dans le Nord-du-Québec et l'Abitibi-Témiscamingue. Cette répartition spatiale semble étroitement liée à la localisation des principaux foyers d'incendie durant l'été 2023. Les régions de l'est de la Baie-James et de l'est subarctique ont enregistré les plus importantes superficies brûlées de la province et ont concentré une grande partie de l'activité des feux (Boulanger et al., 2025). Les fortes concentrations de PM_{2,5} mesurées dans les stations situées à proximité de ces secteurs suggèrent donc que les émissions issues de la combustion de la biomasse ont constitué une source dominante de particules fines durant cette période. Cette situation peut également être associée aux conditions climatiques exceptionnelles observées en 2023, notamment les températures élevées, la fonte précoce du couvert neigeux et les déficits de précipitations qui ont favorisé l'allumage et la propagation des incendies (Boulanger et al., 2025 ; Jain et al., 2024). Ces résultats sont également cohérents avec les observations de Zhang et al. (2025), qui montrent que les régions les plus directement exposées aux fumées des feux de forêt présentent généralement les concentrations de PM_{2,5} les plus élevées.

Toutefois, la proximité des incendies ne suffit pas à expliquer l'ensemble des concentrations observées. Certaines stations éloignées des foyers d'incendie ont également enregistré des concentrations élevées, ce qui montre que l'influence des feux dépend aussi des conditions météorologiques, de la direction des vents et de la circulation atmosphérique. Les variations rapides des concentrations quotidiennes observées dans plusieurs stations suggèrent que les panaches de fumée se sont déplacés à travers le territoire québécois. Cette interprétation est cohérente avec les observations montrant que les fumées des feux canadiens de 2023 ont circulé à travers l'Amérique du Nord et jusqu'en Europe, tandis que plusieurs panaches issus des feux québécois ont affecté des régions situées à plusieurs centaines de kilomètres des foyers d'incendie (Zhang et al., 2025 ; Boulanger et al., 2025). Les résultats montrent ainsi que les impacts des feux de forêt dépassent largement les zones directement brûlées.

La concentration des dépassements durant les mois de juin et juillet renforce également cette interprétation. Cette période correspond au développement rapide des principaux incendies au Québec et au Canada. Boulanger et al. (2025) indiquent que des épisodes d'orages accompagnés de foudre ont

déclenché plus de 120 feux au Québec au début du mois de juin, contribuant à l'augmentation rapide du nombre d'incendies actifs. La concordance entre cette intensification de l'activité des feux et les pics de PM_{2,5} observés dans plusieurs stations suggère une relation étroite entre l'évolution des incendies et la dégradation de la qualité de l'air (Jain et al., 2024 ; Boulanger et al., 2025).

Les résultats suggèrent ainsi que les concentrations de PM_{2,5} ont réagi rapidement à l'évolution des incendies, démontrant la sensibilité de la qualité de l'air québécoise aux épisodes de combustion à grande échelle. Cette interprétation doit toutefois être nuancée, puisque l'absence d'analyse des trajectoires des masses d'air ne permet pas de quantifier précisément la contribution du transport atmosphérique dans chaque région. De plus, la couverture inégale du réseau de surveillance, particulièrement dans les régions éloignées, peut influencer l'interprétation spatiale des résultats.

5.3. Dépassements des normes de qualité de l'air

Les dépassements de la norme quotidienne de 30 µg/m³ observés dans plusieurs stations montrent que les épisodes de fumée de 2023 ont atteint un niveau préoccupant pour la qualité de l'air. Le fait que certaines journées aient dépassé 100 µg/m³, particulièrement dans les régions nordiques, indique que l'été 2023 se distingue nettement des conditions habituellement observées au Québec.

Cette interprétation est cohérente avec les travaux de Zhang et al. (2025), qui rapportent plusieurs épisodes extrêmes de pollution atmosphérique en Amérique du Nord durant les incendies de 2023, ainsi qu'avec ceux de Jain et al. (2024), qui soulignent une augmentation exceptionnelle des alertes de mauvaise qualité de l'air au Canada. Les résultats obtenus suggèrent donc que les épisodes de fumée ont temporairement dépassé la capacité habituelle de dispersion atmosphérique dans plusieurs régions du Québec.

Au-delà de l'intensité des concentrations observées, la répétition des dépassements sur plusieurs journées consécutives suggère une exposition prolongée aux particules fines. Cette observation est importante, puisqu'elle montre que l'enjeu ne concerne pas uniquement les pics de pollution, mais également leur durée. Les régions nordiques et nord-ouest semblent ainsi avoir subi une pression atmosphérique plus soutenue que d'autres secteurs du territoire.

Cette interprétation concorde également avec les observations du RSQAQ, qui identifient les PM_{2,5} comme les principaux contaminants responsables des épisodes de mauvaise qualité de l'air au Québec,

particulièrement lors des périodes influencées par les feux de forêt et le chauffage résidentiel au bois (MELCCFP, 2024).

Il demeure toutefois important de distinguer les concentrations mesurées par les stations de surveillance de l'exposition réelle des populations. Les stations fournissent une mesure de la qualité de l'air ambiant, alors que l'exposition individuelle dépend également de facteurs tels que le temps passé à l'extérieur, la qualité de l'air intérieur et les comportements de protection. Les dépassements observés témoignent donc clairement d'une dégradation de la qualité de l'air, sans permettre d'estimer précisément l'exposition réelle de chaque individu.

5.4. Influence des conditions climatiques et caractère exceptionnel de la saison 2023

Les fortes concentrations de PM_{2,5} observées durant l'été 2023 semblent étroitement liées à un contexte climatique particulièrement favorable aux incendies. La température moyenne durant la saison des feux de 2023 était environ 2,2 °C plus élevée que la moyenne observée entre 1991 et 2020 (Jain et al., 2024). Le Québec a également connu sa période mai-août la plus chaude depuis 1950, tandis que certaines régions de la Baie-James ont enregistré des épisodes de sécheresse parmi les plus sévères jamais observés (Boulanger et al., 2025). Ces conditions ont favorisé l'assèchement de la végétation, augmenté l'inflammabilité des combustibles forestiers et facilité la propagation rapide des incendies. Les concentrations élevées de PM_{2,5} observées en 2023 apparaissent ainsi comme le résultat d'une combinaison de facteurs climatiques et environnementaux ayant favorisé la production et l'accumulation de fumée à grande échelle.

Le caractère exceptionnel de la saison 2023 est également confirmé par plusieurs indicateurs. Les émissions de carbone et de particules associées aux feux de forêt ont atteint des niveaux records au Canada depuis au moins vingt ans (Zhang et al., 2025), tandis que l'activité des feux dans certaines régions nordiques du Québec était sans précédent depuis plus de 220 ans (Boulanger et al., 2025). Ces observations renforcent l'idée que les concentrations de PM_{2,5} mesurées en 2023 dépassent largement la variabilité habituellement observée au Québec.

Les résultats suggèrent ainsi une relation indirecte, mais importante, entre les changements climatiques et la qualité de l'air. Les changements climatiques ne produisent pas directement les PM_{2,5}, mais ils favorisent

des conditions propices à des feux plus fréquents, plus étendus et plus difficiles à contrôler, ce qui peut entraîner une détérioration marquée de la qualité de l'air.

Cette interprétation est cohérente avec les données récentes du RSQAQ, qui montrent une amélioration de la qualité de l'air en 2024 comparativement à 2023, principalement en raison d'une saison estivale moins affectée par les feux de forêt (MELCCFP, 2024). Ce contraste entre les deux années suggère que l'intensité exceptionnelle des incendies a fortement contribué à la dégradation atmosphérique observée en 2023.

Toutefois, les changements climatiques ne constituent pas l'unique facteur explicatif. Les feux de forêt sont également influencés par la végétation, la foudre, les activités humaines, l'aménagement forestier et les conditions météorologiques à court terme. De plus, la comparaison entre 2022 et 2023 permet surtout de mettre en évidence le caractère exceptionnel de l'année 2023, sans pour autant permettre l'analyse de tendances climatiques à long terme.

Par ailleurs, même si les concentrations de PM_{2,5} montrent globalement une tendance à la baisse au Québec depuis les années 2000, les données du RSQAQ indiquent que les feux de forêt continuent de provoquer des augmentations ponctuelles importantes des concentrations atmosphériques (MELCCFP, 2024). Cette situation montre que les événements extrêmes peuvent temporairement compromettre certains progrès réalisés en matière de qualité de l'air.

5.5. Impacts potentiels sur la santé publique

Les résultats obtenus mettent en évidence l'importance des feux de forêt comme enjeu sanitaire. Les fortes concentrations de PM_{2,5} observées dans plusieurs régions du Québec suggèrent que certaines populations ont été exposées à une charge particulaire élevée durant les épisodes de fumée. Cette situation est préoccupante puisque les PM_{2,5} peuvent pénétrer profondément dans le système respiratoire et sont associées à divers effets sur la santé, particulièrement chez les populations vulnérables.

Zhang et al. (2025) estiment qu'environ 354 millions de personnes en Amérique du Nord et en Europe ont été exposées à des épisodes de pollution atmosphérique liés aux feux canadiens de 2023. Les auteurs rapportent également plusieurs milliers de décès attribuables à l'exposition aux PM_{2,5} provenant des fumées de feux de forêt. Bien que cette étude ne permette pas de mesurer directement ces impacts

sanitaires au Québec, les concentrations observées suggèrent que les conditions atmosphériques étaient compatibles avec un risque accru pour la santé.

Les résultats montrent ainsi que les conséquences des feux de forêt dépassent largement les enjeux forestiers ou climatiques. Lorsque les fumées atteignent les zones habitées, elles peuvent exposer les populations à des concentrations de particules fines susceptibles d'aggraver certains problèmes respiratoires ou cardiovasculaires, particulièrement chez les enfants, les personnes âgées et les individus déjà atteints de problèmes de santé (Shin et al., 2024).

Toutefois, cette interprétation doit demeurer prudente. Cette étude ne contient ni données médicales ni données individuelles d'exposition et ne permet donc pas d'établir un lien direct entre les concentrations mesurées et des effets sanitaires précis au Québec. De plus, la composition chimique des particules n'a pas été analysée, alors que celle-ci peut influencer leur toxicité. Les résultats permettent ainsi de mettre en évidence un risque important, sans toutefois quantifier directement les conséquences sanitaires associées aux épisodes de fumée.

5.6. Limites de l'étude

Cette étude présente plusieurs limites méthodologiques qui doivent être prises en compte dans l'interprétation des résultats. D'abord, les données proviennent d'un nombre limité de stations de surveillance. Certaines régions du Québec, particulièrement les régions éloignées, demeurent moins bien couvertes par les réseaux de mesure, ce qui peut limiter la représentativité spatiale des résultats. Les concentrations observées fournissent donc un portrait important de la situation, sans toutefois couvrir parfaitement l'ensemble du territoire.

Cette contrainte est d'autant plus pertinente que le RSQAQ demeure un réseau en évolution, avec l'ajout récent de nouvelles stations visant à améliorer la couverture du territoire québécois (MELCCFP, 2024). Cela suggère que certaines régions demeurent encore moins documentées que d'autres sur le plan de la surveillance atmosphérique.

Les concentrations de PM_{2,5} peuvent également être influencées par plusieurs facteurs locaux, notamment les conditions météorologiques, la distance des incendies, la topographie, la direction des vents et la présence d'autres sources de pollution. Certaines variations régionales pourraient ainsi être

associées à des sources locales, comme les activités industrielles, le chauffage résidentiel ou le transport routier. Cette réalité limite la possibilité d'attribuer l'ensemble des concentrations élevées uniquement aux feux de forêt.

Une autre limite concerne l'absence d'analyses chimiques détaillées des particules. Sans ces analyses, il demeure difficile de distinguer précisément les PM_{2,5} provenant des fumées de feux de forêt de celles issues d'autres sources. Cette contrainte ne remet pas en question la cohérence générale des résultats, mais elle réduit la précision de l'attribution des sources de pollution.

En outre, cette étude ne permet pas d'évaluer directement l'exposition individuelle des populations ni les impacts sanitaires réels associés aux concentrations observées. Les stations fixes mesurent les concentrations ambiantes, alors que l'exposition réelle varie selon les comportements, les lieux de vie, les déplacements et la qualité de l'air intérieur. Malgré ces limites, les tendances observées demeurent cohérentes avec la littérature scientifique récente portant sur les feux de forêt de 2023 au Canada. Les résultats doivent donc être interprétés comme une analyse environnementale globale de la situation plutôt que comme une attribution complète et définitive des sources ou des impacts sanitaires.

CONCLUSION

Cet essai avait pour objectif d'analyser l'influence des feux de forêt sur les concentrations de particules fines PM_{2,5} ainsi que sur la qualité de l'air au Québec durant l'été 2023. À partir des données du Réseau de surveillance de la qualité de l'air du Québec et de la littérature scientifique récente, les résultats montrent que les incendies de forêt ont constitué un facteur majeur de dégradation de la qualité de l'air durant cette période. Les épisodes de fumée ont contribué à une augmentation importante des concentrations de PM_{2,5} dans plusieurs régions du Québec et à de nombreux dépassements de la norme quotidienne de 30 µg/m³.

Les résultats mettent également en évidence le caractère exceptionnel de la saison des feux de 2023. Les fortes concentrations observées dans plusieurs régions montrent que les impacts des incendies dépassent largement les zones directement touchées, notamment en raison du transport atmosphérique des panaches de fumée. Les variations spatiales observées soulignent ainsi la capacité des feux de forêt à modifier rapidement la qualité de l'air à l'échelle régionale et provinciale.

Au-delà du transport atmosphérique des fumées, les résultats suggèrent également que les conditions climatiques ayant marqué l'été 2023 ont contribué à l'ampleur des épisodes de pollution observés.

L'analyse suggère également que les concentrations élevées de PM_{2,5} observées en 2023 s'inscrivent dans un contexte climatique favorable au développement et à la propagation des incendies. Les conditions de chaleur et de sécheresse ayant marqué cette saison ont contribué à accentuer les émissions de fumée et l'ampleur des épisodes de pollution atmosphérique observés au Québec.

Cette étude met aussi en évidence l'importance des feux de forêt comme enjeu de santé publique. Bien que les impacts sanitaires n'aient pas été évalués directement, les concentrations observées indiquent que plusieurs populations ont été exposées à des niveaux de pollution susceptibles d'augmenter les risques pour la santé, particulièrement chez les groupes les plus vulnérables.

Certaines limites doivent toutefois être considérées. Les données utilisées ne permettent pas d'isoler précisément la contribution des feux de forêt par rapport aux autres sources de pollution ni d'évaluer

l'exposition individuelle des populations. Malgré ces limites, les résultats demeurent cohérents avec les tendances rapportées dans la littérature scientifique récente.

Dans un contexte où les changements climatiques pourraient favoriser des saisons de feux plus fréquentes et plus intenses, la qualité de l'air apparaît désormais comme un enjeu central d'adaptation environnementale et de protection de la santé publique au Québec.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agence de la santé publique du Canada. (2023). *Les feux de forêt au Canada : Trousse d'outils destinée aux autorités de santé publique*. Gouvernement du Canada.
https://publications.gc.ca/collections/collection_2023/aspc-phac/HP5-161-2023-fra.pdf
- Aguilera, R., Corringham, T., Gershunov, A., & Benmarhnia, T. (2021). Wildfire smoke impacts respiratory health more than fine particles from other sources: Observational evidence from Southern California. *Nature Communications*, 12(1), 1493. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21708-0>
- Ashraf, S., Pausata, F. S. R., Leroyer, S., Stevens, R., & Munoz-Alpizar, R. (2025). Impact of reduced anthropogenic emissions associated with covid-19 lockdown on pm_{2.5} concentration and canopy urban heat island in canada. *GeoHealth*, 9(2), e2023GH000975.
<https://doi.org/10.1029/2023GH000975>
- Bai, L., Kwong, J. C., Kaufman, J. S., Benmarhnia, T., Chen, C., Van Donkelaar, A., Martin, R. V., Kim, J., Lu, H., Burnett, R. T., & Chen, H. (2024). Effect modification by statin use status on the association between fine particulate matter (PM_{2.5}) and cardiovascular mortality. *International Journal of Epidemiology*, 53(4), dyae084. <https://doi.org/10.1093/ije/dyae084>
- Beilstein, J., Rich, D. Q., Audebert, H. J., & Glatz, T. (2026). The short-term association of PM_{2.5} and stroke : A time-stratified case-crossover study in Berlin, Germany. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 19(4), 71. <https://doi.org/10.1007/s11869-026-01928-3>
- Boulanger, Y., Arseneault, D., Bélisle, A. C., Bergeron, Y., Boucher, J., Boucher, Y., Danneyrolles, V., Erni, S., Gachon, P., Girardin, M. P., Grant, E., Grondin, P., Jetté, J.-P., Labadie, G., Leblond, M., Leduc, A., Pascual, J., St-Laurent, M.-H., Tremblay, J. A., & Waldron, K. (2025). La saison des feux de forêt 2023 au Québec : Un aperçu des conditions extrêmes, des impacts, des leçons apprises et des considérations pour l'avenir. *Canadian Journal of Forest Research*, 55, 1-23.
<https://doi.org/10.1139/cjfr-2024-0230>
- Buteau, S., Veira, P., Bilodeau-Bertrand, M., & Auger, N. (2023). Association between first trimester exposure to ambient pm_{2.5} and no₂ and congenital heart defects: A population-based cohort study of 1,342,198 live births in canada. *Environmental Health Perspectives*, 131(6), 067009.
<https://doi.org/10.1289/EHP11120>
- Environnement et Changement climatique Canada. (2017). *Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement : Émissions de polluants atmosphériques*. Gouvernement du Canada, août 2017.
<https://publications.gc.ca/site/eng/9.839973/publication.html>
- Gaspard, E., Smargiassi, A., Lavigne, É., Ho, V., Ayoub, A., Auger, N., & Buteau, S. (2025). Association between childhood cancer and prenatal exposure to ambient PM_{2.5} and NO₂ : A population-based cohort study in Canada. *Environmental Research*, 286, 122927.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.122927>
- Gouvernement du Québec. (2025). *Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère*, RLRQ, c. Q-2, r. 4.1.
<https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/>

- Jain, P., Barber, Q. E., Taylor, S. W., Whitman, E., Castellanos Acuna, D., Boulanger, Y., Chavardès, R. D., Chen, J., Englefield, P., Flannigan, M., Girardin, M. P., Hanes, C. C., Little, J., Morrison, K., Skakun, R. S., Thompson, D. K., Wang, X., & Parisien, M.-A. (2024). Drivers and impacts of the record-breaking 2023 wildfire season in Canada. *Nature Communications*, 15(1), 6764. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-51154-7>
- Lim, S., Bassey, E., Bos, B., Makacha, L., Varaden, D., Arku, R. E., Baumgartner, J., Brauer, M., Ezzati, M., Kelly, F. J., & Barratt, B. (2022). Comparing human exposure to fine particulate matter in low and high-income countries: A systematic review of studies measuring personal PM2.5 exposure. *Science of The Total Environment*, 833, 155207. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155207>
- Lin, H., Zhang, X., Hu, Y., & Zhang, S. (2024). Unacknowledged health costs of subway transportation : Commuting time dominant environmental inequality in PM2.5 exposure. *Journal of Transport & Health*, 38, 101865. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2024.101865>
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and health impacts of air pollution: A review. *Frontiers in Public Health*, 8, 14. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>
- Matz, C. J., Egyed, M., Xi, G., Racine, J., Pavlovic, R., Rittmaster, R., Henderson, S. B., & Stieb, D. M. (2020). Health impact analysis of PM2.5 from wildfire smoke in Canada (2013–2015, 2017–2018). *Science of The Total Environment*, 725, 138506. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138506>
- Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP). (2023). *Influence des feux de forêt de l'été 2023 sur la qualité de l'air au Québec : Rapport 2023*. Gouvernement du Québec. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/air/feux-foret/feu-foret-qualite-air-2023.pdf>
- Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP). (2024). *Revue 2024 de la qualité de l'air au Québec : Réseau de surveillance de la qualité de l'air du Québec*. Gouvernement du Québec. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/air/revue-qualite-air/revue-qualite-air-2024.pdf>
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE LA LUTTE CONTRE LESCHANGEMENTS CLIMATIQUES, DE LA FAUNE ET DES PARCS (MELCCFP). (2025). Bilan de la qualité de l'air au Québec 2023. Québec, ministère de l'environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs, Direction principale de la qualité de l'air et du climat, 73 p. + 25 annexes [En ligne], [https://www.environnement.gouv.qc.ca/air/rapports-qualite-air.htm].
- Mullen, C., Grineski, S., Collins, T., Xing, W., Whitaker, R., Sayahi, T., Becnel, T., Goffin, P., Gaillardon, P.-E., Meyer, M., & Kelly, K. (2020). Patterns of distributive environmental inequity under different PM2.5 air pollution scenarios for Salt Lake County public schools. *Environmental Research*, 186, 109543. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109543>
- Organisation mondiale de la Santé. (2021). *Lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air : Particules (PM2,5 et PM10), ozone, dioxyde d'azote, dioxyde de soufre et monoxyde de carbone : Résumé d'orientation*. Organisation mondiale de la Santé. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/346555/9789240035423-fre.pdf>

- Ouranos. (2017). *Impacts des feux de forêt sur le secteur forestier québécois dans un climat variable et en évolution*. Ouranos. https://www.ouranos.ca/sites/default/files/2022-12/hors_proj-2017-lajoie-feux_foret_0.pdf
- Paul, N., Yao, J., McLean, K. E., Stieb, D. M., & Henderson, S. B. (2022). The Canadian Optimized Statistical Smoke Exposure Model (Canossem) : A machine learning approach to estimate national daily fine particulate matter (PM2.5) exposure. *Science of The Total Environment*, 850, 157956. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157956>
- Rangel-Alvarado, R., Pal, D., & Ariya, P. (2022). PM2.5 decadal data in cold vs. mild climate airports: COVID-19 era and a call for sustainable air quality policy. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(38), 58133-58148. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19708-8>
- Raza, W., Orru, H., Olstrup, H., & Sommar, J. N. (2026). The effect of long-term PM2.5 exposure on all-cause mortality estimated using meta-regression: A meta-analysis of concentration–response by air pollution exposure assessment method. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 19(3), 51. <https://doi.org/10.1007/s11869-026-01936-3>
- Ripley, S., Maher, B. A., Hatzopoulou, M., & Weichenthal, S. (2024). Within-city spatial variations in PM2.5 magnetite nanoparticles and brain cancer incidence in Toronto and Montreal, Canada. *Scientific Reports*, 14(1), 12136. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58119-2>
- Ressources naturelles Canada. (2023). *Canadian National Fire Database (CNFDB) – Fire Perimeters*. Gouvernement du Canada. <https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/ha/nfdb>
- Santé Canada. (2023). *Impacts sur la santé de la pollution de l'air au Canada provenant du transport, de l'industrie et de la combustion résidentielle : Estimations des décès prématurés et des effets non mortels à l'échelle nationale, provinciale, territoriale et des zones atmosphériques*. Gouvernement du Canada. https://publications.gc.ca/collections/collection_2023/sc-hc/H144-112-2022-fra.pdf
- Shin, H. H., Owen, J., Delic, A. O., Kabasakal, M., & Buteau, S. (2024). Modifying factors and temporal trends of adverse health effects of short-term exposure to PM2.5 in Canada (2001–2018). *Science of The Total Environment*, 955, 177046. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177046>
- Shin, H. H., Kabasakal, M., Owen, J. G., Delic, A. O., Kunarac, K., & Buteau, S. (2026). Impact of population density and industrial activity on PM2.5-Related adverse health outcomes: A study of the Quebec–Ontario corridor in Canada. *Chemosphere*, 394, 144796. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144796>
- Weichenthal, S., Lavigne, E., Traub, A., Umbrio, D., You, H., Pollitt, K., Shin, T., Kulka, R., Stieb, D. M., Korsiak, J., Jessiman, B., Brook, J. R., Hatzopoulou, M., Evans, G., & Burnett, R. T. (2021). Association of sulfur, transition metals, and the oxidative potential of outdoor pm2. 5 with acute cardiovascular events: A case-crossover study of canadian adults. *Environmental Health Perspectives*, 129(10), 107005. <https://doi.org/10.1289/EHP9449>
- Yang, L., Wan, W., Yu, C., Xuan, C., Zheng, P., & Yan, J. (2022). Associations between PM2.5 exposure and Alzheimer's Disease prevalence Among elderly in eastern China. *Environmental Health*, 21(1), 119. <https://doi.org/10.1186/s12940-022-00937-w>

- Yitshak-Sade, M., Nethery, R., Schwartz, J. D., Mealli, F., Dominici, F., Di, Q., Abu Awad, Y., Ifergane, G., & Zanobetti, A. (2021). PM2.5 and hospital admissions among Medicare enrollees with chronic debilitating brain disorders. *Science of The Total Environment*, 755, 142524.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142524>
- Zhang, Q., Wang, Y., Xiao, Q., Geng, G., Davis, S. J., Liu, X., Yang, J., Liu, J., Huang, W., He, C., Luo, B., Martin, R. V., Brauer, M., Randerson, J. T., & He, K. (2025). Long-range PM2.5 pollution and health impacts from the 2023 Canadian wildfires. *Nature*, 645(8081), 672-678.
<https://doi.org/10.1038/s41586-025-09482-1>
- Zhao, N., Smargiassi, A., Hatzopoulou, M., Colmegna, I., Hudson, M., Fritzler, M. J., Awadalla, P., & Bernatsky, S. (2020). Long-term exposure to a mixture of industrial SO2, NO2, and PM2.5 and anti-citrullinated protein antibody positivity. *Environmental Health*, 19(1), 86.
<https://doi.org/10.1186/s12940-020-00637-3>