Nº 82-003-X au catalogue
ISSN 1209-1375

Rapports sur la santé

Évaluer les inégalités à l'échelle nationale de l'exposition au dioxyde d'azote au Canada



par Elysia G. Fuller-Thomson, Mathieu Rouleau, Toyib Olaniyan et Amanda J. Pappin

Date de diffusion : le 18 novembre 2026

Statistique Canada
Statistics Canada

Canada

Comment obtenir d'autres renseignements

Pour toute demande de renseignements au sujet de ce produit ou sur l'ensemble des données et des services de Statistique Canada, visiter notre site Web à www.statcan.gc.ca.

Vous pouvez également communiquer avec nous par :

Courriel à infostats@statcan.gc.ca

Téléphone entre 8 h 30 et 16 h 30 du lundi au vendredi aux numéros suivants :

- Service de renseignements statistiques 1-800-263-1136
- Service national d'appareils de télécommunications pour les malentendants 1-800-363-7629
- Télécopieur 1-514-283-9350

Normes de service à la clientèle

Statistique Canada s'engage à fournir à ses clients des services rapides, fiables et courtois. À cet égard, notre organisme s'est doté de normes de service à la clientèle que les employés observent. Pour obtenir une copie de ces normes de service, veuillez communiquer avec Statistique Canada au numéro sans frais 1-800-263-1136. Les normes de service sont aussi publiées sur le site www.statcan.gc.ca sous « Contactez-nous » > « Normes de service à la clientèle ».

Note de reconnaissance

Le succès du système statistique du Canada repose sur un partenariat bien établi entre Statistique Canada et la population du Canada, les entreprises, les administrations et les autres organismes. Sans cette collaboration et cette bonne volonté, il serait impossible de produire des statistiques exactes et actuelles.

Publication autorisée par la ministre responsable de Statistique Canada

© Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représenté par la ministre de l'Industrie, 2026

L'utilisation de la présente publication est assujettie aux modalités de l'entente de licence ouverte de Statistique Canada.

Une version HTML est aussi disponible.

This publication is also available in English.

Évaluer les inégalités à l'échelle nationale de l'exposition au dioxyde d'azote au Canada

par Elysia G. Fuller-Thomson, Mathieu Rouleau, Toyib Olaniyan et Amanda J. Pappin

DOI : https://www.doi.org/10.25318/82-003-x202601100002-fra

Résumé

Contexte : Le dioxyde d'azote (NO_2), un polluant atmosphérique attribuable à la circulation, est nocif pour la santé humaine. Des études menées au Canada ont montré des liens entre un faible statut socioéconomique et une exposition au NO_2 dans plusieurs villes. À la connaissance des auteurs, aucune étude n'a visé à déterminer s'il existe des inégalités à l'échelle nationale pour ce qui est de l'exposition au NO_2 au Canada.

Données et méthodes : Les données relatives au statut socioéconomique tirées du Recensement de 2021 et de l'Indice canadien de défavorisation multiple (ICDM) ont été couplées à un modèle national des concentrations de NO_2 pour 2019 au niveau de l'aire de diffusion (AD). Les associations entre les variables socioéconomiques régionales et l'exposition au NO_2 ont fait l'objet d'une évaluation dans toutes les régions métropolitaines de recensement (RMR) à l'aide de modèles de moindres carrés ordinaires, d'effets mixtes linéaires et d'autorégression simultanée.

Résultats : Les proportions de populations racisées et à faible revenu au niveau de l'AD sont associées à une exposition plus élevée au NO_2. Les différentes approches de modélisation statistique donnent des résultats cohérents, qui persistent lorsqu'ils sont stratifiés par région urbaine. Les autres variables socioéconomiques présentent des associations faibles, négatives ou incohérentes avec l'exposition au NO_2. L'analyse reposant sur l'ICDM met également en lumière le fait que les AD où l'on enregistre des niveaux plus élevés d'instabilité résidentielle et une composition ethnoculturelle plus diversifiée étaient uniformément associées à une exposition accrue au NO_2.

Interprétations : Les résultats indiquent l'existence d'inégalités environnementales à l'échelle nationale pour ce qui est de l'exposition au NO_2 dans les RMR canadiennes. Les régions caractérisées par des proportions plus élevées de populations racisées étaient associées à une exposition accrue au NO_2, ce qui correspond aux résultats présentés dans de nombreux autres pays à revenu élevé.

Mots-clés : dioxyde d'azote, justice environnementale, statut socioéconomique, populations racisées, pollution de l'air

Auteurs

Elysia G. Fuller-Thomson, Mathieu Rouleau et Amanda J. Pappin travaillent au Bureau de la qualité de l'eau et de l'air, à la Direction générale de la santé environnementale et de la sécurité des consommateurs de Santé Canada. Toyib Olaniyan travaille à la Division de l'analyse et de la modélisation de la santé de Statistique Canada.

Ce que l'on sait déjà sur le sujet

- L'exposition à la pollution de l'air au Canada nuit considérablement à la santé et cause des milliers de décès chaque année.
- Des études antérieures ont permis de relever des inégalités socioéconomiques en ce qui a trait à l'exposition à la pollution de l'air liée aux transports dans les villes les plus peuplées du Canada. Cette constatation s'observe en particulier dans les régions comptant une plus forte proportion de groupes à faible revenu et de populations racisées.

Ce qu'apporte l'étude

- La présente étude est la première à fournir des données probantes à l'échelle nationale sur les disparités environnementales liées au statut socioéconomique et à l'exposition au dioxyde d'azote (NO_2) au Canada.
- Les régions affichant des proportions plus élevées de populations racisées et à faible revenu, ainsi qu'une composition ethnoculturelle plus diversifiée et des niveaux supérieurs d'instabilité résidentielle, étaient les plus fortement associées à une exposition accrue au NO_2.
- Les données attestant de disparités en matière d'exposition au NO_2, même dans les municipalités à faible exposition, mettent en lumière des occasions d'intervenir de façon tangible à l'amélioration de la gestion de la qualité de l'air partout au Canada.

Introduction

L'exposition au dioxyde d'azote (NO_2) est associée à plusieurs effets nocifs pour la santé. Les données révèlent un lien de causalité probable entre l'exposition prolongée au NO_2 et le taux de morbidité attribuable à des maladies respiratoires. Elles font aussi état d'une relation de causalité probable entre l'exposition à court terme au NO_2 et la mortalité totale non-accidentelle et la mortalité liée à des causes cardiopulmonaires, cardiovasculaires ou respiratoires[1]. Le NO_2 dans l'air ambiant provient des émissions directes de NO_2 et des réactions atmosphériques des polluants, notamment l'oxyde d'azote (NO). Le NO et le NO_2, qui sont émis conjointement et déclarés comme des émissions de NO_x, sont un produit de la combustion, principalement généré par les transports, les appareils mobiles et les sources industrielles. Les quantités de NO_x rejetées sont plus élevées dans les régions urbaines, où l'on retrouve une concentration de ces principales sources d'émission. Comme les polluants NO_x réagissent rapidement dans l'atmosphère, le NO_2 présente de forts gradients spatiaux dans les environnements urbains, ce qui entraîne d'importantes disparités entre les quartiers en matière d'exposition[1]. Il est essentiel de comprendre le recoupement de ces gradients d'exposition et de la répartition spatiale des groupes démographiques en milieu urbain pour évaluer les inégalités environnementales et y remédier.

Bien que le NO_2 soit réparti de manière inégale selon le statut socioéconomique dans de nombreux pays à revenu élevé, l'existence d'inégalités à l'échelle nationale pour ce qui est de l'exposition au NO_2 au Canada n'est pas encore bien comprise[2-6]. Dans les plus grandes villes du pays, les quartiers où la proportion de personnes touchant un faible revenu est plus élevée (p. ex. revenu médian plus faible, prévalence de ménages à faible revenu, mesures de défavorisation intégrant le revenu) sont davantage exposés au NO_2 à l'échelle régionale selon de nombreuses études[7-13]. À Montréal, la proportion de personnes appartenant à une population racisée, ainsi que l'isolement linguistique et la présence d'immigrants s'y rattachant, est significativement associée à une exposition plus élevée au NO_2[8, 11, 12]. Cependant, à Vancouver et dans la grande région de Toronto, les données sont moins cohérentes quant au sens et à la force de l'association entre la proportion de personnes appartenant à une population

racisée et l'exposition au NO_2[7, 9-13]. De nombreuses autres proportions de sous-populations (p. ex. fondées sur l'identité autochtone, l'âge et le niveau de scolarité) tendent à présenter des données moins cohérentes concernant les inégalités environnementales, les conclusions variant selon l'emplacement ou la méthode statistique[8, 11, 14, 15]. En outre, les disparités ayant trait à l'exposition au NO_2 sont rarement caractérisées en dehors des grandes villes du Canada[13-15]. Cette hétérogénéité des inégalités environnementales, combinée au manque d'études portant sur des régions autres que les grandes villes canadiennes, rend difficile l'extrapolation des résultats à l'ensemble du pays.

L'évaluation des inégalités environnementales à l'échelle nationale nécessite un modèle des concentrations de NO_2 dont la résolution spatiale est suffisamment fine pour rendre compte des forts gradients spatiaux intra-urbains et urbains-ruraux qui caractérisent les concentrations du polluant et la répartition des groupes démographiques. Les défis pour modéliser adéquatement les concentrations de NO_2 dans l'air ambiant à l'échelle nationale comprennent également le nombre limité de sites de surveillance au sol. Pour relever ces défis, les modèles de régression de l'utilisation des terres peuvent intégrer des données satellitaires ainsi que des données sur l'utilisation des terres et des observations de surveillance au niveau du sol, ce qui permet d'estimer les concentrations de NO^2 de façon continue et d'offrir une analyse plus étendue sur le plan spatial[16, 17].

La présente étude vise à évaluer les associations entre les attributs démographiques des quartiers et la répartition des concentrations de NO_2 dans l'air ambiant dans les villes canadiennes et, en particulier, à cerner les groupes démographiques qui résident dans des régions où l'exposition au NO_2 est élevée. Elle permet ainsi d'évaluer les associations entre l'exposition au NO_2 et les mesures de statut socioéconomique fondées sur la région, en s'appuyant d'abord sur des caractéristiques socioéconomiques mesurées dans le Recensement de la population du Canada de 2021 et, ensuite, sur l'Indice canadien de défavorisation multiple (ICDM). Les résultats aident à mieux comprendre les inégalités environnementales au Canada, dans diverses villes et à l'échelle nationale, et fournissent des renseignements sur les populations les plus à risque à la pollution atmosphérique.

Méthodes

Données sur l'exposition au dioxyde d'azote

Les données de concentrations de NO_2 sur lesquelles repose cette analyse ont été produites antérieurement à l'aide d'un modèle hybride de régression de l'utilisation des terres permettant d'estimer les concentrations annuelles moyennes de NO_2 partout au Canada pour 2019[16]. Le modèle d'exposition s'appuie sur la régression linéaire pour combiner des variables d'utilisation des sols (p. ex. les zones tampons routières, les zones tampons liées à l'utilisation industrielle du sol, la densité de population, la verdure) avec des observations de NO_2 au niveau du sol, des variables météorologiques (p. ex. la moyenne quotidienne des précipitations, la température maximale moyenne quotidienne), ainsi que des données satellitaires récupérées de l'Instrument de surveillance de l'ozone de la National Aeronautics and Space Administration. Le modèle d'exposition au NO_2 a été calibré pour 2019 au moyen de mesures issues du Programme de surveillance national de la pollution atmosphérique[18]. On observe une corrélation modérée entre les concentrations prédites de NO_2 issues du modèle de régression de l'utilisation des terres et les concentrations observées par validation croisée (valeur ajustée du R-carré = 0,63); les résultats indiquent un écart moyen de 2,2 parties par milliard (ppb) mesuré par la racine de l'erreur quadratique moyenne[18]. Les concentrations modélisées de NO_2 ont été calculées au niveau de l'îlot de diffusion, mais ont fait l'objet d'une moyenne pour générer des estimations des concentrations au niveau de l'aire de diffusion (AD), soit l'unité spatiale d'analyse de la présente étude.

Données démographiques

Les données démographiques sont tirées du Recensement de la population de 2021. Des variables socioéconomiques précises issues du recensement ont été choisies selon les résultats d'études antérieures sur les disparités d'exposition au NO_2 au Canada[7-12, 14]. Ces variables comprenaient, pour chaque AD, les proportions de personnes de 14 ans ou moins, de personnes de 65 ans et plus, de personnes racisées, de personnes autochtones, de personnes de 15 ans et plus n'ayant pas de diplôme d'études secondaires, de personnes vivant dans des ménages privés et de personnes vivant sous le seuil de faible revenu (SFR). Le SFR est défini à l'aide des revenus après impôt, de la taille des familles et du lieu de résidence, et il permet de déterminer les familles qui consacrent en théorie 20 % de plus de leurs revenus nets que la famille moyenne de recensement à leurs besoins de base[19]. En outre, l'ICDM offre une analyse complémentaire en rendant compte des nombreuses dimensions de la défavorisation au Canada[13, 20, 21]. L'ICDM provient d'une analyse des composantes principales de plusieurs variables du recensement et permet de répartir les populations de manière globale en fonction de leur score de marginalisation selon quatre dimensions : instabilité résidentielle, composition ethnoculturelle, dépendance économique et vulnérabilité situationnelle[21]. La recherche en santé environnementale s'appuie sur des indices pour mesurer le statut socioéconomique, car ils permettent de saisir ce statut de manière plus générale que les variables individuelles et de régler les problèmes potentiels de colinéarité[12, 13]. Cependant, les indices présentent certains inconvénients importants, y compris une interprétation moins directe et l'intégration dans un seul indice de plusieurs variables associées de façon contraire au phénomène étudié. Ces avantages et inconvénients ont motivé l'utilisation des deux approches dans cette étude. Chaque variable socioéconomique a été transformée en score z en fonction de la répartition observée dans l'ensemble des régions métropolitaines de recensement (RMR) pour faciliter la comparaison entre les variables.

Toutes les données démographiques ont été obtenues au niveau de l'AD. Les AD sont de petites unités géographiques relativement stables comptant une population moyenne de 400 à 700 habitants. Elles constituent la plus petite unité géographique pour laquelle le public peut obtenir des données socioéconomiques[19]. Dans le cadre de toutes les analyses, l'étendue spatiale a été limitée à l'ensemble des RMR pour tenir compte d'éventuelles différences spatiales non rajustées entre les régions urbaines et rurales au Canada. Les populations rurales ont été exclues des analyses finales. Au Canada, 74 % de la population réside dans une RMR.

Analyse statistique

Pour évaluer une association linéaire entre l'exposition au NO_2 et le statut socioéconomique, la modélisation de régression par les moindres carrés ordinaires (MCO) a été utilisée en parallèle avec des diagnostics de régression standard permettant d'évaluer la multicolinéarité. Pour tenir compte des différences d'exposition entre les RMR, un modèle linéaire à effets mixtes pour chaque RMR a été appliqué avec des ordonnées à l'origine aléatoire afin de tenir compte des différences marquées dans l'exposition au NO_2 entre les RMR. Si les résidus du modèle par les MCO présentent une autocorrélation spatiale, comme le démontre la statistique *I* de Moran, les résultats du modèle pourraient être inexacts en raison des tendances spatiales sous-jacentes des données[22]. Pour tenir compte de cette autocorrélation spatiale, un modèle d'autorégression simultanée (SAR) comprenant une variable dépendante à décalage spatial a été utilisé (voir l'équation 1) :

$$(1)\ y = \rho W y + X\beta + \varepsilon,$$

où *y* est le vecteur d'exposition au NO_2 au niveau de l'AD; ρ, le paramètre de Wy, la variable dépendante de décalage spatial de l'exposition au NO_2 des AD voisines, et W, une matrice de pondération spatiale fondée sur la contiguïté de type « reine » de premier ordre. β est un vecteur des paramètres pour la matrice X des variables socioéconomiques indépendantes; et ε, un vecteur des termes d'erreur[23]. $\boldsymbol{\beta}$

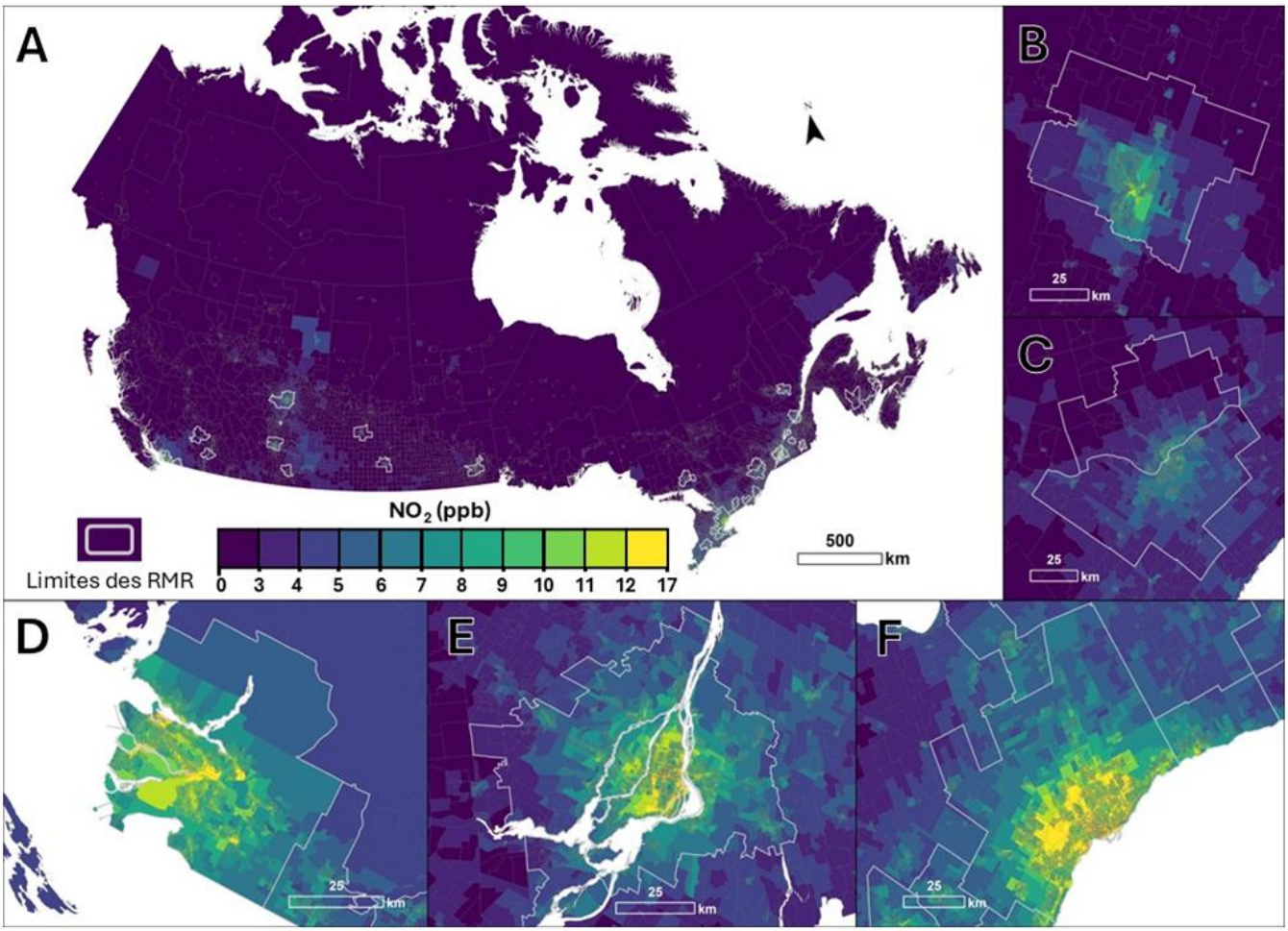
représente un effet direct (local), qui ne tient pas compte de la dépendance spatiale, alors que toute variation de X se propage également indirectement par l'intermédiaire de *Wy*. L'équation 1 a fait l'objet d'une modélisation à deux reprises : une première fois avec X qui contenait six variables socioéconomiques de recensement, puis une seconde fois avec X qui contenait les quatre dimensions de l'ICDM. Comme l'ont montré LeSage et Pace, les coefficients des modèles d'autorégression spatiale ne peuvent pas être interprétés directement en raison des effets du décalage spatial de la variable dépendante[24]. L'interprétation se fonde plutôt sur des effets directs, indirects et globaux. Les effets directs mesurent l'effet moyen d'une variation dans une variable socioéconomique sur l'AD concernée. Les effets indirects mesurent l'effet moyen de cette variation sur d'autres AD. Les effets globaux correspondent à la somme des effets directs et indirects et mesurent l'effet moyen total d'une variation dans une variable socioéconomique[24]. Le logiciel RStudio (R 4.4.3) a été utilisé aux fins de l'analyse et le logiciel ArcGIS Pro 3.2 a servi à la cartographie. L'analyse SAR a été répétée au moyen d'analyses stratifiées propres aux RMR pour examiner l'hétérogénéité dans les associations liées aux inégalités environnementales entre les différentes municipalités.

Résultats

Exposition au dioxyde d'azote

Les concentrations annuelles d'exposition au NO_2 s'élevaient en moyenne à 7,2 ppb dans l'ensemble du pays en 2019. Lorsqu'on ne tient compte que des populations dans les RMR, l'exposition moyenne au NO_2 totalisait 8,3 ppb, allant d'une exposition minimale de 0,0 ppb à une exposition maximale de 16,9 ppb. Les trois RMR du Canada les plus peuplées affichaient les niveaux d'exposition les plus élevés, les moyennes pondérées en fonction de la population s'établissant à 11,0 ppb à Toronto, à 9,7 ppb à Vancouver et à 9,0 ppb à Montréal (voir la figure 1).

Figure 1
Exposition au dioxyde d'azote selon l'aire de diffusion pour l'ensemble du Canada (A), et images de cette exposition pour les cinq régions métropolitaines de recensement les plus peuplées, de la plus petite population à la plus grande : Calgary (B), Ottawa–Gatineau (C), Vancouver (D), Montréal (E), et Toronto (F)



Source : P. Hystad, A. Larkin, Updated Canadian NO_2 Land Use Regression Model for 2019 and Predictions of Canadian NO_2 Concentrations, 2022.

Le tableau 1 fait ressortir les tendances relatives à l'exposition au NO_2 pour chaque variable de recensement. Les gradients unidirectionnels les plus forts de l'exposition au NO_2 sont observés pour les proportions de personnes de 14 ans et plus, de personnes vivant sous le SFR et de personnes appartenant à une population racisée. Du quintile supérieur au quintile inférieur de chaque variable, l'exposition médiane varie de 9,3 ppb à 7,7 ppb, de 6,8 ppb à 10,2 ppb et de 5,6 ppb à 10,4 ppb, respectivement. Le tableau 2 montre la variation de l'exposition au NO_2 selon les quintiles des quatre dimensions de l'ICDM. Le gradient unidirectionnel le plus important est associé à la dimension de la composition ethnoculturelle. On observe toutefois des tendances non uniformes dans les quintiles pour les autres dimensions de l'ICDM. L'exposition médiane au NO_2 selon la composition ethnoculturelle varie de 5,5 ppb dans le quintile inférieur à 10,5 ppb dans le quintile supérieur.

Tableau 1
Répartition de l'exposition au dioxyde d'azote dans les régions métropolitaines de recensement canadiennes, selon le quintile des caractéristiques socioéconomiques, 2019

	Exposition au dioxyde d'azote (parties par milliard)		
Quintiles de la variable de recensement	25e	50e (médiane)	75e
Proportion de personnes âgées de 14 ans ou moins			
1 (inférieur)	7,1	9,3	11,4
2	6,6	8,6	10,6
3	6,5	8,3	10,2
4	6,2	8,0	9,8
5 (supérieur)	6,4	7,7	9,3
Proportion de personnes âgées de 65 ans et plus			
1 (inférieur)	7,0	8,5	10,5
2	6,8	8,8	10,6
3	6,4	8,3	10,3
4	6,1	7,9	9,8
5 (supérieur)	6,1	7,6	9,6
Proportion de personnes autochtones			
1 (inférieur)	6,6	8,3	10,0
2	9,5	10,8	11,6
3	7,0	8,5	10,2
4	6,0	7,4	8,9
5 (supérieur)	5,3	6,6	8,0
Proportion de personnes sans diplôme d'études secondaires[1]			
1 (inférieur)	6,8	8,7	11,0
2	6,3	7,9	9,9
3	6,4	8,0	9,9
4	6,5	8,2	10,2
5 (supérieur)	6,9	8,6	10,5
Proportion de personnes vivant sous le seuil de faible revenu[2]			
1 (inférieur)	5,3	6,8	8,2
2	6,2	7,6	9,2
3	7,0	8,6	10,4
4	7,8	9,5	11,0
5 (supérieur)	8,2	10,2	11,6
Proportion de personnes appartenant à une population racisée			
1 (inférieur)	4,3	5,6	6,9
2	5,8	7,1	8,4
3	6,8	8,1	9,6
4	7,5	8,9	10,5
5 (supérieur)	9,1	10,4	11,4

1. Proportion de personnes âgées de 15 ans et plus sans diplôme d'études secondaires et vivant dans des ménages privés.
2. Le seuil de faible revenu est défini à l'aide des revenus après impôt, de la taille de la famille et du lieu de résidence, et il permet de déterminer les familles qui consacrent en théorie 20 % de plus de leurs revenus après impôts que la famille moyenne de recensement à leurs besoins de base.

Sources : Statistique Canada, Recensement de la population de 2021; P. Hystad et A. Larkin, *Updated Canadian NO_2 Land Use Regression Model for 2019 and Predictions of Canadian NO_2 Concentrations*, 2022.

Tableau 2
Répartition de l'exposition au dioxyde d'azote dans les régions métropolitaines de recensement au Canada, selon le quintile des dimensions de l'Indice canadien de défavorisation multiple

	percentiles au Canada (ppb)		
Quintiles de l'Indice canadien de défavorisation multiple	25e	50e (médiane)	75e
Dépendance économique			
1	6,4	7,9	9,9
2	6,7	8,4	10,3
3	6,6	8,5	10,4
4	6,6	8,3	10,4
5	6,6	8,3	10,4
Vulnérabilité situationnelle			
1	6,6	8,4	10,4
2	6,4	8,0	10,0
3	6,4	8,0	10,1
4	6,6	8,2	10,4
5	6,9	8,6	10,5
Instabilité résidentielle			
1	6,2	8,0	10,0
2	5,9	7,6	9,5
3	6,2	7,7	9,4
4	6,8	8,4	10,4
5	7,7	9,6	11,5
Composition ethnoculturelle			
1	4,3	5,5	6,8
2	5,9	7,0	8,2
3	6,9	8,1	9,6
4	7,6	9,0	10,5
5	9,2	10,5	11,4

Sources : Statistique Canada, Indice canadien de défavorisation multiple, 2021; P. Hystad et A. Larkin, *Updated Canadian NO_2 Land Use Regression Model for 2019 and Predictions of Canadian NO_2 Concentrations*, 2022.

Associations entre l'exposition au dioxyde d'azote et le statut socioéconomique

Lorsqu'on évalue les associations entre les variables de recensement et l'exposition au NO_2, les modèles de MCO et d'effets mixtes linéaires permettent de démontrer l'existence d'une autocorrélation spatiale (voir le tableau 3). Le modèle SAR traite de cette préoccupation et ne révèle plus une autocorrélation spatiale, selon la statistique *I* de Moran. Dans ce modèle, une augmentation d'un écart-type, ou 25,6 %, dans la population racisée au niveau de la région était associée à une hausse de 0,09 ppb de l'exposition au NO_2, après le rajustement pour toutes les autres variables du recensement incluses dans le modèle. D'autres effets indirects se propagent également aux AD voisines selon le paramètre ρ. Comme il est indiqué dans le tableau 3, le modèle SAR montre que les AD enregistrant des proportions plus élevées de résidents racisés, de personnes ne possédant pas de diplôme d'études secondaires et de ménages vivant sous le SFR affichent une association positive et significative sur le plan statistique avec l'exposition au NO_2. En revanche, tous les modèles montrent que les AD dont les proportions de personnes de 14 ans ou moins et de personnes de 65 ans et plus sont plus élevées ont affiché une association négative avec l'exposition au NO_2. La proportion de personnes autochtones révèle des associations mixtes selon le modèle. L'existence d'une autocorrélation spatiale limite les conclusions pouvant être tirées du modèle des effets mixtes linéaires. Toutefois, la similarité dans les associations positives et négatives les plus fortes avec l'exposition au NO_2 pourrait laisser entendre que des inégalités au sein des RMR contribuent à plusieurs des associations observées.

Tableau 3
Associations entre le statut socioéconomique et l'exposition au dioxyde d'azote dans les régions métropolitaines de recensement au Canada

Paramètre du modèle	Régression par les moindres carrés ordinaires	Modèle d'effets mixtes linéaires avec ordonnée à l'origine aléatoire	Modèle d'autorégression simultanée (à décalage spatial)
Ajustement du modèle			
Valeur ajustée du R-carré	0,42 ***	...	...
Logarithme du rapport de vraisemblance	-71 120	-56 407	-34 358
AIC	142 257	112 832	68 734
Autocorrélation spatiale			
I de Moran	0.80 ***	0,73 ***	-0,05 [1]
Caractéristiques socioéconomiques (scores z)			
Ordonnée à l'origine			
Estimation	8,249 ***	6,658 ***	0,587 ***
Limite inférieure de l'IC à 95 %	8,230	6,164	0,558
Limite supérieure de l'IC à 95 %	8,270	7,152	0,616
Proportion de personnes âgées de 14 ans ou moins (écart-type = 5,1 %)			
Estimation	-0,431 ***	-0,351 ***	-0,042 ***
Limite inférieure de l'IC à 95 %	-0,457	-0,368	-0,050
Limite supérieure de l'IC à 95 %	-0,404	-0,333	-0,034
Proportion de personnes âgées de 65 ans et plus (écart-type = 9,8 %)			
Estimation	-0,261 ***	-0,196 ***	-0,033 ***
Limite inférieure de l'IC à 95 %	-0,287	-0,213	-0,041
Limite supérieure de l'IC à 95 %	-0,235	-0,179	-0,025
Proportion de personnes autochtones (écart-type = 5,7 %)			
Estimation	-0,702 ***	0,0577 ***	-0.037 ***
Limite inférieure de l'IC à 95 %	-0,727	0,035	-0,045
Limite supérieure de l'IC à 95 %	-0,677	0,080	-0.030
Proportion de personnes sans un diplôme d'études secondaires[2] (écart-type = 8,4 %)			
Estimation	0,102 ***	0,011	0.0281 ***
Limite inférieure de l'IC à 95 %	0,081	-0,004	0,022
Limite supérieure de l'IC à 95 %	0,123	0,025	0,035
Proportion de personnes vivant sous le seuil de faible revenu[3] (écart-type = 5,2 %)			
Estimation	0,379 ***	0,440 ***	0,047 ***
Limite inférieure de l'IC à 95 %	0,355	0,424	0,04
Limite supérieure de l'IC à 95 %	0,402	0,455	0,055
Proportion de personnes appartenant à une population racisée (écart-type = 25,6 %)			
Estimation	1,099 ***	0,396 ***	0,094 ***
Limite inférieure de l'IC à 95 %	1,077	0,378	0,086
Limite supérieure de l'IC à 95 %	1,121	0,415	0,102

... n'ayant pas lieu de figurer

*** valeur significativement différente de l'estimation pour la catégorie de référence ($p < 0.001$)

1. valeur de $p = 1$

2. Proportion de personnes âgées de 15 ans et plus sans diplôme d'études secondaires et vivant dans des ménages privés. permet de déterminer les familles qui consacrent en théorie 20 % de plus de leurs revenus après impôt que la famille moyenne de recensement à leurs besoins de base.

Notes : AIC = critère d'information d'Akaike. IC = intervalle de confiance.

Sources : Statistique Canada, Recensement de la population de 2021; P. Hystad et A. Larkin, *Updated Canadian NO2 Land Use Regression Model for 2019 and Predictions of Canadian NO2 Concentrations, 2022.*

Le tableau 4 présente un ensemble similaire de modèles utilisés pour évaluer l'association entre les dimensions de l'ICDM et l'exposition au NO_2. Après la prise en compte de l'autocorrélation spatiale, les hypothèses nécessaires de la modélisation de régression linéaire sont confirmées par le modèle SAR. Pour tous les modèles, l'instabilité résidentielle et la composition ethnoculturelle au niveau de l'AD sont associées de façon positive et significative à l'exposition au NO_2. Des associations négatives sont observées entre les dimensions de la dépendance économique et de la vulnérabilité situationnelle et l'exposition au NO_2 (tableau 4). Une augmentation d'un écart-type de la composition ethnoculturelle était associée à une hausse directe de 0,114 ppb de l'exposition au NO_2, à laquelle s'ajoutaient des effets indirects se propageant dans les AD voisines par l'intermédiaire de ρ. Dans l'analyse, la dimension de la vulnérabilité situationnelle comprend la proportion de la population autochtone et la proportion de personnes ne possédant pas de diplôme d'études secondaires, deux variables présentant des associations de sens opposés lorsqu'elles font l'objet d'une modélisation dans le modèle SAR (tableau 3). Les effets moyens directs, indirects et globaux des modèles SAR sont présentés dans les tableaux A1 et A2 en annexe; la variation d'un seul écart-type dans la proportion des personnes appartenant à des populations racisées, la composition ethnoculturelle ou l'instabilité résidentielle est associée à une augmentation de l'exposition au NO_2 supérieure à 1 ppb, ce qui tient compte des effets directs et spatiaux qui en découlent.

Tableau 4
Associations entre les dimensions de l'Indice canadien de défavorisation multiple et l'exposition au dioxyde d'azote dans les régions métropolitaines de recensement canadiennes

Paramètre du modèle	Régression par les moindres carrés ordinaires	Modèle d'effets mixtes linéaires avec ordonnée à l'origine aléatoire	Modèle d'autorégression simultanée (à décalage spatial)
Ajustement du modèle			
Valeur ajustée de R-carré	0,42 ***	...	...
Logarithme du rapport de vraisemblance	-78 693	-61 154	-35 815
AIC	157 399	122 323	71 643
Autocorrélation spatiale			
I de Moran	0,79 ***	0,69 ***	-0,06 [1]
Caractéristiques socioéconomiques : scores z des dimensions de l'ICDM			
Ordonnée à l'origine			
Estimation	8,202 ***	6,577 ***	0,513 ***
Limite inférieure de l'IC à 95 %	8,183	6,091	0,487
Limite supérieure de l'IC à 95 %	8,221	7,063	0,539
Dépendance économique			
Estimation	-0,030 **	-0,044 ***	-0,009 ***
Limite inférieure de l'IC à 95 %	-0,050	-0,057	-0,015
Limite supérieure de l'IC à 95 %	-0,011	-0,032	-0,004
Vulnérabilité situationnelle			
Estimation	-0,421 ***	-0,089 ***	-0,022 ***
Limite inférieure de l'IC à 95 %	-0,442	-0,103	-0,028
Limite supérieure de l'IC à 95 %	-0,400	-0,075	-0,016
Instabilité résidentielle			
Estimation	0,581 ***	0,677 ***	0,097 ***
Limite inférieure de l'IC à 95 %	0,560	0,663	0,090
Limite supérieure de l'IC à 95 %	0,601	0,691	0,103
Composition ethnoculturelle			
Estimation	1,509 ***	0,527 ***	0,114 ***
Limite inférieure de l'IC à 95 %	1,489	0,510	0,108
Limite supérieure de l'IC à 95 %	1,528	0,543	0,121

... n'ayant pas lieu de figurer

** valeur significativement différente de l'estimation pour la catégorie de référence ($p < 0.01$)

*** valeur significativement différente de l'estimation pour la catégorie de référence ($p < 0.001$)

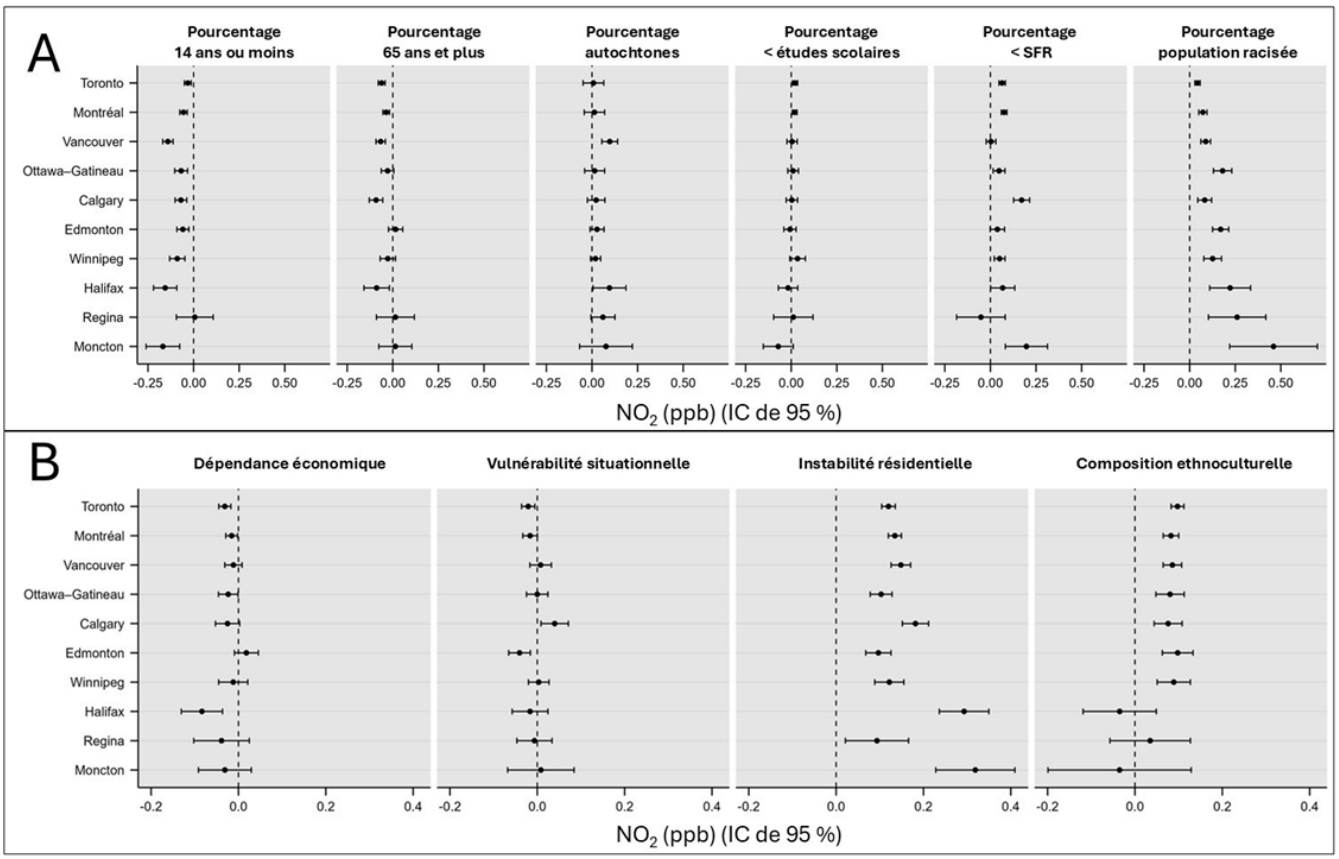
1. valeur de $p = 1$

Notes : AIC = critère d'information d'Akaike. IC = intervalle de confiance.

Sources : Statistique Canada, Recensement de la population de 2021; P. Hystad et A. Larkin, *Updated Canadian NO2 Land Use Regression Model for 2019 and Predictions of Canadian NO2 Concentrations, 2022*.

L'analyse stratifiée propre aux RMR montre des associations intra-urbaines relativement uniformes dont le sens est similaire à celui observé dans l'analyse nationale. La figure 2 montre les tendances d'association entre certaines RMR peuplées (voir la figure A1 en annexe pour un portrait de toutes les RMR). Les résultats de cette étude, notamment les associations positives entre la proportion de personnes appartenant à une population racisée et la dimension de la composition ethnoculturelle (qui mesure la présence de traits liés aux immigrants dans le recensement) ainsi que l'exposition au NO_2, fournissent des données attestant de disparités environnementales pour les populations racisées dans les RMR les plus peuplées du Canada. L'instabilité résidentielle est systématiquement associée de façon positive à l'exposition au NO_2 dans toutes les RMR canadiennes; l'association est significative dans toutes les RMR sauf Red Deer, en Alberta. L'instabilité résidentielle est une mesure du caractère transitoire et de la cohésion des quartiers qui combine la proportion de personnes vivant en appartement, de personnes vivant seules, de personnes qui ne sont pas des propriétaires, de personnes récemment déménagées, et de personnes non mariées ainsi que le revenu médian des ménages. La proportion de personnes vivant sous le SFR présente des associations positives avec l'exposition au NO_2 pour 36 des 41 RMR canadiennes. Pour les groupes d'âge examinés (14 ans ou moins, 65 ans ou plus), les associations au sein des RMR avec l'exposition au NO_2 sont généralement négatives pour les RMR les plus peuplées et négligeables pour les autres RMR. Les résultats relatifs aux autres caractéristiques socioéconomiques sont non uniformes, la plupart des RMR présentant des associations non significatives et, dans l'ensemble, de plus faible ampleur.

Figure 2
Coefficients β du modèle d'autorégression simultanée (décalage spatial) établissant une association entre une augmentation d'un écart-type des proportions de sous-populations et des différences dans les concentrations moyennes de dioxyde d'azote dans les aires de diffusion de 10 régions métropolitaines de recensement très peuplées



Notes : NO_2 = dioxyde d'azote; ppb = parties par milliard; IC = intervalle de confiance. SFR = seuil de faible revenu. Tous les coefficients β provenaient de modèles rajustés simultanément pour d'autres caractéristiques au niveau des aires de diffusion, y compris A) les autres variables socioéconomiques de recensement; et B) les autres dimensions de l'Indice canadien de défavorisation multiple. Pour un portrait de toutes les régions métropolitaines de recensement, veuillez consulter la figure A.1 en annexe.
Sources : Statistique Canada, Recensement de la population de 2021 et Indice canadien de défavorisation multiple de 2021; et P. Hystad, A. Larkin, 2022, *Updated Canadian NO_2 Land Use Regression Model for 2019 and Predictions of Canadian NO_2 Concentrations.*

Discussion

Cette analyse fournit des données soutenant l'existence d'inégalités environnementales généralisées dans l'exposition à la pollution de l'air au Canada. Elle renforce également le constat récurrent d'inégalités fondées sur les revenus en ce qui a trait à l'exposition au NO_2 au pays au moyen de diverses approches statistiques et échelles spatiales. La prévalence de la pauvreté dans une région, notamment selon les mesures de faible revenu, est régulièrement associée à une exposition accrue au NO_2 dans les études portant sur plus d'une ville[12, 14], dans celles menées à Vancouver[9], à Toronto[7] et à Montréal[8,12, 14], de même que dans la présente analyse nationale de toutes les régions urbaines au Canada. Cependant, Pinault et coll.[11] n'ont pas relevé d'associations significatives entre la proportion de personnes vivant sous le SFR et l'exposition au NO_2 à Montréal, à Vancouver ou à Toronto, après la prise en compte des indicateurs de défavorisation sociale (c.-à-d. le fait de vivre seul, d'être célibataire, de vivre dans une famille monoparentale et de vivre l'isolement linguistique), dont beaucoup présentent une corrélation avec des mesures de pauvreté.

Des études antérieures ont fait état d'associations mixtes entre l'exposition au NO_2 et les populations racisées, ou des mesures connexes telles que l'isolement linguistique ou le statut d'immigrant, au sein des villes canadiennes. Des corrélations négatives ou faibles ont été observées à Toronto, à Peel et à Vancouver[7, 9, 12, 13] et des associations positives l'ont été à Toronto et à Montréal[8, 10-12]. Les résultats de la présente étude, notamment les associations positives entre l'exposition au NO_2 et les populations racisées ainsi que la composition ethnoculturelle, fournissent des données attestant d'inégalités environnementales pour les groupes racisés. Ces inégalités ne se résument pas qu'à une seule ville canadienne; il s'agit en réalité d'une tendance observée dans les RMR à l'échelle nationale. Ces associations concordent avec l'ensemble croissant de données probantes internationales selon lesquelles les populations racisées, ou les populations immigrantes qui leur sont souvent associées, sont exposées de manière disproportionnée au NO_2 dans les pays à revenu élevé, dont les États-Unis[2, 25], l'Angleterre[3], l'Allemagne[26], les Pays-Bas[3, 27] et la plupart des pays nordiques[5]. Le sens de l'association pour d'autres facteurs socioéconomiques, tels que l'âge, le revenu et le niveau de scolarité, est moins cohérent dans les pays à revenu élevé[2, 3, 5, 27].

L'uniformité globale des associations avec l'exposition au NO_2 observée dans l'analyse stratifiée montre que lorsque les associations sont plus fortes, qu'elles soient positives ou négatives, les inégalités sont régulièrement présentes dans la plupart des RMR et ne s'expliquent pas uniquement par des différences interurbaines démographiques. Malgré l'utilisation de méthodes statistiques similaires, les associations avec l'exposition au NO_2 relevées dans cette analyse stratifiée diffèrent parfois des travaux précédents. Par exemple, les résultats de cette étude indiquent une association positive entre l'exposition au NO_2 et les régions comptant une plus grande proportion de personnes n'ayant pas de diplôme d'études secondaires à Montréal, alors que des études antérieures ont relevé le lien inverse[8,11]. À Toronto, les populations racisées n'ont pas été significativement associées à l'exposition au NO_2 dans une étude précédente, contrairement à l'association constatée dans la présente analyse[7]. Pour mieux comprendre l'origine de ces résultats différents, de futures études pourraient examiner l'incidence du choix du modèle d'exposition au NO_2, de la définition des limites municipales, de l'inclusion des variables et de la méthode statistique sur les estimations des disparités de l'exposition. Beaucoup de ces facteurs varient d'une étude à l'autre et peuvent contribuer aux incohérences observées dans la littérature.

Dans l'ensemble, ces résultats permettent de mieux comprendre les deux volets des inégalités de l'exposition au NO_2 au Canada. Les AD affichant des proportions plus élevées de populations racisées et à faible revenu, ainsi que des niveaux plus élevés d'instabilité résidentielle, par exemple, sont régulièrement associées à une exposition accrue au NO_2 à l'échelle nationale. En revanche, les inégalités en matière d'exposition au NO_2 associées à d'autres variables socioéconomiques montrent une tendance nationale moins cohérente, des associations faibles et opposées étant observées lorsqu'elles sont

stratifiées par RMR. On peut donc supposer que les tendances sont propres à chaque ville. Par conséquent, les résultats de la recherche sur les inégalités environnementales et l'exposition à la pollution de l'air ne devraient pas nécessairement être extrapolés au-delà de l'échelle spatiale et de la variable socioéconomique examinée dans l'étude. Cette mise en garde vaut au sein d'un même pays, tant qu'on n'en saura pas davantage sur les processus sous-jacents à l'origine de ces inégalités environnementales.

Lors de la détermination des mesures appropriées du statut socioéconomique, on a observé des associations de sens opposé avec l'exposition au NO_2 pour la proportion de la population ayant déclaré être Autochtone et la proportion de personnes n'ayant pas de diplôme d'études secondaires, deux variables incluses dans la dimension de vulnérabilité situationnelle de l'ICDM. Cette constatation met en lumière l'hétérogénéité des inégalités environnementales entre différentes mesures d'indicateurs socioéconomiques et certains des défis associés à l'utilisation des indices. En revanche, l'association substantielle et constante entre l'exposition au NO_2 et l'instabilité résidentielle montre comment l'ICDM rend compte du caractère multidimensionnel des inégalités environnementales d'une manière que les variables individuelles ne permettraient pas de saisir. Tant que les processus qui alimentent les inégalités environnementales ne seront pas mieux compris, il est utile de se servir des indices parallèlement aux variables socioéconomiques individuelles.

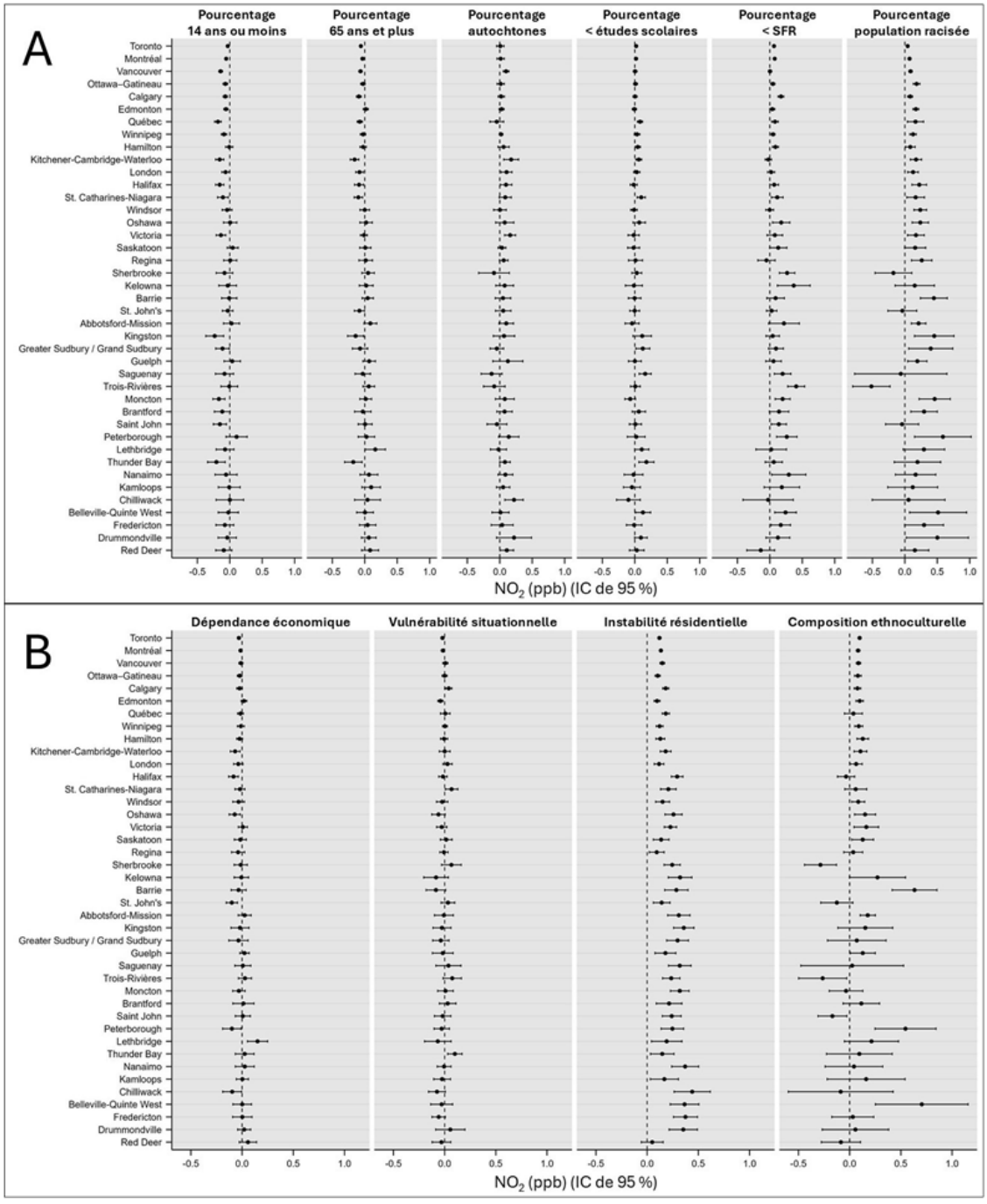
Des études futures adoptant une perspective nationale seront nécessaires pour mieux comprendre les rouages des inégalités environnementales à différentes échelles spatiales au Canada. Des études antérieures ont fourni des données indiquant que les groupes socialement défavorisés ont tendance à vivre plus près de la circulation, une principale source d'exposition au NO_2 en milieu urbain[18]. D'autres travaux visant à déterminer les causes de ces inégalités amélioreraient la compréhension des mécanismes possibles qui les sous-tendent, y compris l'accessibilité au logement, la structure urbaine, les décisions d'urbanisme et les tendances liées à l'établissement des populations immigrantes. Bien qu'il ait été avancé que bon nombre de ces facteurs contribuent aux inégalités environnementales, ces facteurs n'ont pas été évalués de manière approfondie dans la littérature canadienne[11-13]. De plus, l'examen des tendances au fil du temps et pour des secteurs d'émissions précis pourrait éclairer l'incidence des mesures de gestion de la qualité de l'air sur les inégalités environnementales. Même si les mécanismes de causalité sous-jacents établissant un lien entre le statut socioéconomique et l'exposition au NO_2 demeurent peu compris, cette recherche peut orienter les efforts d'atténuation des risques en cernant les populations les plus exposées et susceptibles de bénéficier d'une gestion des risques adaptée.

La présente étude est limitée par le fait qu'elle repose sur les conditions socioéconomiques au niveau de la région plutôt qu'au niveau de la personne. Des études antérieures laissent entendre que les conditions socioéconomiques régionales ont tendance à être plus fortement associées à l'exposition à la pollution de l'air[28-30]. L'exposition extérieure au NO_2 dans l'air ambiant, qui affiche déjà une faible corrélation à l'exposition personnelle, pourrait renforcer les biais, car différents groupes socioéconomiques présentent des tendances différentes pour ce qui est du travail, du navettage ou du logement, qui ont tous une incidence sur le lien entre l'exposition extérieure et l'exposition personnelle[31-35]. En outre, ces résultats s'appliquent aux RMR et ne peuvent pas être extrapolés aux populations rurales, en particulier pour des caractéristiques socioéconomiques disproportionnellement concentrées dans les régions rurales, telles que l'identité autochtone. Par ailleurs, les populations rurales peuvent être exposées à un moins grand nombre de sources de pollution de l'air, mais à des sources plus importantes. Par exemple, des études menées dans une région rurale du nord de la Colombie-Britannique où l'extraction de pétrole et de gaz est réalisée de manière intensive ont montré que les populations autochtones sont inéquitablement surexposées au NO_2[15]. De plus, bien que la normalisation par score z facilite la comparaison de l'ampleur des associations observées, elle peut limiter la validité des conclusions tirées pour des sous-populations dont les proportions sont faibles ou nulles.

Malgré ces limites, la présente étude est la première analyse des associations à l'échelle nationale entre le statut socioéconomique et l'exposition au NO_2 au Canada. Dans cette étude, l'exposition au NO_2 a été associée de façon positive et significative à plusieurs facteurs socioéconomiques dans les RMR au pays. Une population racisée au niveau de la région, le statut de faible revenu des ménages et les dimensions de composition ethnoculturelle et d'instabilité résidentielle mesurées par l'ICDM sont associés aux plus grandes inégalités d'exposition au NO_2. Les associations positives pour ces variables socioéconomiques étaient cohérentes dans les modèles statistiques et sont demeurées présentes dans les analyses stratifiées par RMR, même après la prise en compte de la structure spatiale des données et d'autres mesures du statut socioéconomique.

Annexe

Figure A.1
Coefficients β du modèle d'autorégression simultanée (décalage spatial) établissant une association entre une augmentation d'un écart-type dans des proportions de sous-populations et des différences dans les concentrations moyennes de dioxyde d'azote dans les aires de diffusion pour toutes les régions métropolitaines de recensement



Notes : NO_2 = dioxyde d'azote; ppb = parties par milliard; IC = intervalle de confiance. Tous les coefficients β sont tirés de modèles qui comprennent les autres caractéristiques au niveau de l'aire de diffusion, y compris A) les autres variables socioéconomiques de recensement; et par la suite, B) les autres dimensions de l'Indice canadien de défavorisation multiple.
Sources : Statistique Canada, Recensement de la population de 2021 et Indice canadien de défavorisation multiple de 2021; P. Hystad et A. Larkin, *Updated Canadian NO_2 Land Use Regression Model for 2019 and Predictions of Canadian NO_2 Concentrations*, 2022.

Tableau A1

Effets moyens directs, indirects et globaux du modèle d'autorégression simultanée entre les variables du Recensement de 2021 et l'exposition au dioxyde d'azote

	Effet		
Variable de recensement	**Direct**	**Indirect**	**Global**
Proportion de personnes âgées de 14 ans ou moins	-0,063 ***	-0,532 ***	-0,595 ***
Proportion de personnes âgées de 65 ans et plus	-0,050 ***	-0,417 ***	-0,467 ***
Proportion de personnes autochtones	-0,056 ***	-0,470 ***	-0,526 ***
Proportion de personnes sans un diplôme d'études secondaires[1]	0,042 ***	0,354 ***	0,396 ***
Proportion de personnes vivant sous le seuil de faible revenu[2]	0,071 ***	0,597 ***	0,667 ***
Proportion de personnes appartenant à une population racisée	0,141 ***	1,188 ***	1,329 ***

*** valeur significativement différente de l'estimation pour la catégorie de référence ($p < 0.001$)

privés.

2. Le seuil de faible revenu est défini à l'aide des revenus après impôt, de la taille de la famille et du lieu de résidence, et il permet de déterminer les familles qui consacrent en théorie 20 % de plus de leurs revenus après impôt que la famille moyenne de recensement à leurs besoins de base.

Sources : Statistique Canada, Recensement de la population de 2021; P. Hystad et A. Larkin, *Updated Canadian NO2 Land Use Regression Model for 2019 and Predictions of Canadian NO2 Concentrations, 2022.*

Tableau A2

Effets moyens directs, indirects et globaux du modèle d'autorégression simultanée entre les dimensions de l'Indice canadien de défavorisation multiple de 2021 et l'exposition au dioxyde d'azote

	Effet		
Dimensions de l'Indice canadien de défavorisation multiple	**Direct**	**Indirect**	**Global**
Dépendance économique	-0,014 ***	-0,138 ***	-0,152 ***
Vulnérabilité situationnelle	-0,033 ***	-0,322 ***	-0,355 ***
Instabilité résidentielle	0,144 ***	1,412 ***	1,555 ***
Composition ethnoculturelle	0,170 ***	1,673 ***	1,844 ***

*** valeur significativement différente de l'estimation pour la catégorie de référence ($p < 0.001$)

Sources : Statistique Canada, Indice canadien de défavorisation multiple de 2021; P. Hystad et A. Larkin, *Updated Canadian NO2 Land Use Regression Model for 2019 and Predictions of Canadian NO2 Concentrations, 2022.*

Références

1. Santé Canada, Évaluation des risques pour la santé humaine du dioxyde d'azote ambiant. 2016. https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/publications/vie-saine/evaluation-risques-pour-sante-humaine-dioxyde-azote-ambiant.html.

2. L. P. Clark, D. B. Millet et J. D. Marshall, National Patterns in Environmental Injustice and Inequality: Outdoor NO2 Air Pollution in the United States, PLOS One, 9(4), 2014, p. e94431. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0094431.

3. D. Fecht, P. Fischer, L. Fortunato et coll., Associations between air pollution and socioeconomic characteristics, ethnicity and age profile of neighbourhoods in England and the Netherlands, Environmental Pollution, 198, 2015, p. 201-210. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.12.014.

4. A. Hajat, C. Hsia et M. S. O'Neill, Socioeconomic Disparities and Air Pollution Exposure: A Global Review, Current Environmental Health Reports, 2(4), 2015, p. 440-450. https://doi.org/10.1007/s40572-015-0069-5.

5. A. Strandell, K. Nurmio, I. Seifert-Dähnn et coll., Air pollution inequality and its temporal trends in Nordic countries, International Journal of Environmental Studies, 81(5), 2024, p. 2203-2226. https://doi.org/10.1080/00207233.2024.2403952.

6. T. Mustansar, L. van den Brekel, E. J. Timmermans, C. Agyemang et I. Vaartjes, Air pollution exposure disparities among ethnic groups in high-income countries: A scoping review, Environmental Research, 267, 2025, p. 120-647. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120647.

7. M. Buzelli et M. Jerrett, Geographies of Susceptibility and Exposure in the City: Environmental Inequity of Traffic-Related Air Pollution in Toronto, Canadian Journal of Regional Science, 30(2), 2007, p. 195-210.

8. D. L. Crouse, N. A. Ross et M. S. Goldberg, Double burden of deprivation and high concentrations of ambient air pollution at the neighbourhood scale in Montreal, Canada, Social Science & Medicine, 69(6), 2009, p. 971-981. https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2009.07.010.

9. J.G. Su, T. Larson, T. Gould, M. Cohen et M. Buzzelli, Transboundary air pollution and environmental justice: Vancouver and Seattle compared, GeoJournal, 75(6), 2010, p. 595-608. https://doi.org/10.1007/s10708-009-9269-6.

10. M. Carrier, P. Apparicio, A.M. Séguin et D. Crouse, The application of three methods to measure the statistical association between different social groups and the concentration of air pollutants in Montreal: A case of environmental equity, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 30, 2014, p. 38-52. https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.05.001.

11. L. Pinault, D. Crouse, M. Jerrett, M. Brauer et M. Tjepkema, Spatial associations between socioeconomic groups and NO2 air pollution exposure within three large Canadian cities, Environmental Research, 147, 2016, p. 373-382. https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.02.033.

12. A. Giang et K. Castellani, Cumulative air pollution indicators highlight unique patterns of injustice in urban Canada, Environmental Research Letters, 15(12), 2020, p. 124063. https://doi.org/10.1088/1748-9326/abcac5.

13. A. Norton, E. G. Fuller-Thomson et M. Adams, Environmental Injustice in Peel Region: A Cross-Sectional Analysis of Air Pollution and Social Vulnerability, Journal of City Climate Policy and Economy, 2(3), 2024. https://doi.org/10.3138/jccpe-2023-0017.

14. D. M. Stieb, M. Smith-Doiron, M. Quick et coll., Inequality in the Distribution of Air Pollution Attributable Mortality Within Canadian Cities, GeoHealth, 7(9), 2023, p. e2023GH000816. https://doi.org/10.1029/2023GH000816.

15. M. Doris, C. Daley, A. Aker et coll., Inequity of Exposure to Unconventional Natural Gas Development in Northeastern British Columbia, Canada—An Environmental Justice Analysis, Environmental Science & Technology, 59(6), 2025 p. 3098-3110. https://doi.org/10.1021/acs.est.4c06086.

16. P. Hystad, E. Setton, A. Cervantes et coll., Creating National Air Pollution Models for Population Exposure Assessment in Canada, Environmental Health Perspectives, 119(8), 2011, p. 1123-1129. https://doi.org/10.1289/ehp.1002976.

17. A. Larkin, J.A. Geddes, R.V. Martin et coll., Global Land Use Regression Model for Nitrogen Dioxide Air Pollution, Environmental Science & Technology, 51(12), 2017, p. 6957-6964. https://doi.org/10.1021/acs.est.7b01148.

18. P. Hystad, A. Larkin, Updated Canadian NO2 Land Use Regression Model for 2019 and Predictions of Canadian NO2 Concentrations, 2022.

19. Statistique Canada, Dictionnaire, Recensement de la population, 2021, 2023, consulté le 23 janvier 2024. https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2021/ref/dict/98-301-x2021001-fra.pdf.

20. F. I. Matheson, J. R. Dunn, K. L. W. Smith, R. Moineddin et R. H. Glazier, Development of the Canadian Marginalization Index: A New Tool for the Study of Inequality, Canadian Journal of Public Health / Revue canadienne de santé publique, 103, 2012, p. S12-S16.

21. Statistique Canada, L'Indice canadien de défavorisation multiple : Guide de l'utilisateur, 2021, 2023. https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/45-20-0001/452000012023002-fra.htm.

22. L. Anselin, Local Indicators of Spatial Association—LISA, Geographical Analysis, 27(2), 1995, p. 93-115. https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x.

23. L. Anselin, Exploring Spatial Data with GeoDaTM: A Workbook, Center for Spatially Integrated Social Science, 2005.

24. J. LeSage et R. K. Pace, Introduction to Spatial Econometrics, Taylor & Francis Group, LLC, 2009.

25. J. Liu, L. P. Clark, M. J. Bechle et coll., Disparities in Air Pollution Exposure in the United States by Race/Ethnicity and Income, 1990–2010, Environmental Health Perspectives, 129(12), 2021, p. 127005. doi:10.1289/EHP8584.

26. I. Ehler, F. Bader, T. Rüttenauer, H. Best, The air pollution disadvantage of immigrants in Germany: Partly a matter of urbanity, European Sociological Review, 40(4), 2024, p. 551-565. https://doi.org/10.1093/esr/jcad046.

27. L. van den Brekel, V. Lenters, J. D. Mackenbach et coll., Ethnic and socioeconomic inequalities in air pollution exposure: A cross-sectional analysis of nationwide individual-level data from the Netherlands, The Lancet Planetary Health, 8(1), 2024, p. e18-e29. https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00258-9.

28. B. Chaix, S. Gustafsson, M. Jerrett et coll., Children's exposure to nitrogen dioxide in Sweden: Investigating environmental injustice in an egalitarian country, Journal of Epidemiology & Community Health, 60(3), 2006, p. 234-241. https://doi.org/10.1136/jech.2005.038190.

29. A. Goodman, P. Wilkinson, M. Stafford et C. Tonne, Characterising socio-economic inequalities in exposure to air pollution: A comparison of socio-economic markers and scales of measurement, Health & Place, 17(3), 2011, p. 767-774. https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2011.02.002.

30. A. Hajat, A. V. Diez-Roux, S. D. Adar et coll., Air Pollution and Individual and Neighborhood Socioeconomic Status: Evidence from the Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis (MESA), Environmental Health Perspectives, 121(11-12), 2013, p. 1325-1333. https://doi.org/10.1289/ehp.1206337.

31. A. Kousa, C. Monn, T. Rotko, S. Alm, L. Oglesby, M.J. Jantunen, Personal exposures to NO2 in the EXPOLIS-study: Relation to residential indoor, outdoor and workplace concentrations in Basel, Helsinki and Prague, Atmospheric Environment, 35(20), 2001, p. 3405-3412. https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00131-5.

32. A. Esplugues, F. Ballester, M. Estarlich et coll., Indoor and outdoor concentrations and determinants of NO2 in a cohort of 1-year-old children in Valencia, Spain, Indoor Air, 20(3), 2010, p. 213-223. https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2010.00646.x.

33. E. Stroh, R. Rittner, A. Oudin et coll., Measured and modeled personal and environmental NO2 exposure, Population Health Metrics, 10(1), 2012, p. 10. https://doi.org/10.1186/1478-7954-10-10.

34. C. Tonne, C. Milà, D. Fecht et coll., Socioeconomic and ethnic inequalities in exposure to air and noise pollution in London, Environment International, vol. 115, 2018, p. 170-179. https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.03.023.

35. T. Liška, M. R. Heal, C. Lin et coll., The effect of workplace mobility on air pollution exposure inequality—a case study in the Central Belt of Scotland, Environmental Research: Health, 2(2), 2024, p. 025006. https://doi.org/10.1088/2752-5309/ad3840.