



DOCUMENT D'ORIENTATION SUR L'AMÉLIORATION DE LA QUALITÉ DE L'AIR DANS LES MÉTROS



Santé
Canada

Health
Canada

Canada 

Santé Canada est le ministère fédéral responsable d'aider les Canadiennes et les Canadiens à maintenir et à améliorer leur état de santé. Santé Canada s'est engagé à améliorer la vie de tous les Canadiens et à faire du Canada l'un des pays où les gens sont le plus en santé au monde, comme en témoignent la longévité, les habitudes de vie et l'utilisation efficace du système public de soins de santé.

Also available in English under the title:
Guidance for Improving Subway Air Quality

Pour obtenir plus d'information, veuillez communiquer avec :

Santé Canada
Indice de l'adresse 0900C2
Ottawa (Ontario) K1A 0K9
Tél. : 613-957-2991
Sans frais : 1-866-225-0709
Télec. : 613-941-5366
ATS : 1-800-465-7735
Courriel : publications-publications@hc-sc.gc.ca

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre de la Santé, 2022

Date de publication : mars 2022

La présente publication peut être reproduite sans autorisation pour usage personnel ou interne seulement, dans la mesure où la source est indiquée en entier.

Cat. : H144-101/2022F-PDF
ISBN : 978-0-660-42506-1
Pub. : 210722

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX.....	VI
LISTE DES FIGURES.....	VIII
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	V
SOMMAIRE.....	1
CHAPITRE 1: INTRODUCTION.....	3
1.1. Réseaux de métro.....	3
1.1.1. Réseaux de métro au Canada.....	3
1.1.2. La pollution de l'air dans les métros.....	3
1.2. Effets des PM _{2,5} sur la santé.....	4
1.3. Raison d'être et champ d'application.....	5
CHAPITRE 2: LA QUALITÉ DE L'AIR DANS LES MÉTROS.....	6
2.1. Sources de particules dans les métros.....	8
2.2. PM _{2,5} dans les métros canadiens.....	9
CHAPITRE 3: STRATÉGIES DE RÉDUCTION DES CONCENTRATIONS DE PM _{2,5} DANS LES MÉTROS.....	12
3.1. Ventilation.....	13
3.2. Portes palières.....	15
3.3. Filtration.....	16
3.4. Aspiration et lavage.....	18
3.5. Réduction des émissions de particules dans les métros.....	19
3.6. Surveillance de la qualité de l'air.....	22
CHAPITRE 4: CONCLUSIONS.....	25
RÉFÉRENCES.....	26
ANNEXE.....	34
Annexe A: Cartes des PM _{2,5} dans les métros.....	34

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 3.1 : Estimation des associations entre les PM _{2,5} et les facteurs du réseau de métro	10
---	----

LISTE DES FIGURES

FIGURE 3.1: Le schéma diurne des PM _{2,5} sur les quais de métro. Ces données représentent les concentrations de PM _{2,5} pour 13 quais de la ligne 1 et 18 quais de la ligne 2 du métro de Toronto (Van Ryswyk et coll., 2021).	7
FIGURE A1: Concentrations de PM _{2,5} dans le métro de Toronto (2010-2011) [Van Ryswyk et coll., 2017]	34
FIGURE A2: Concentrations de PM _{2,5} dans le métro de Montréal (2010-2011) [Van Ryswyk et coll., 2017]	35
FIGURE A3: Concentrations de PM _{2,5} dans le réseau SkyTrain de Vancouver (2013) [Van Ryswyk et coll., 2017]	36

LISTE DES ABRÉVIATIONS

APTA	American Public Transportation Association
CAS	Chemical Abstracts Service
CO	monoxyde de carbone
CO₂	dioxyde de carbone
COMEAP	Committee on the medical effects of air pollution
CVC	chauffage, ventilation et climatisation
EETU	Étude sur l'exposition dans les transports urbains
EQAM	Étude de la qualité de l'air dans le métro
KMOE	Korean Ministry of the Environment
NFPA	National Fire Protection Association
NO	monoxyde d'azote
NO₂	dioxyde d'azote
NO_x	oxydes d'azote
PACM	purificateur d'air pour cabine de métro
PM	particules
PM₁₀	particules d'un diamètre aérodynamique inférieur à 10 µm
PM_{2,5}	particules d'un diamètre aérodynamique inférieur à 2,5 µm
RMS	réseau de métro de Séoul
SVM	système de ventilation mécanique
TfL	Transport for London
TTC	Toronto Transit Commission

SOMMAIRE

Les réseaux de métro sont un élément essentiel du transport en commun. Ils permettent d'accéder à l'emploi et aux services sociaux, de réduire l'utilisation des véhicules privés et de promouvoir l'activité physique. Ensemble, ces avantages représentent un bénéfice sociétal considérable. Cependant, des études menées de par le monde depuis 2000 ont indiqué qu'il pourrait y avoir des concentrations élevées de polluants de l'air dans certains métros. Les particules, et plus spécialement les particules fines (PM_{2,5}), sont le principal polluant en cause. Il est bien établi que les PM_{2,5} peuvent avoir des effets néfastes sur la santé, notamment une mortalité accrue et la survenue de maladies cardiaques et pulmonaires.

Le présent document fournit des conseils aux sociétés de transport en commun et à leurs partenaires municipaux et provinciaux sur les mesures pour atténuer la pollution de l'air dans les métros. Il comprend également des renseignements généraux sur les sources de pollution par les particules dans les métros, les facteurs connexes, un survol de la qualité de l'air dans les métros au Canada et un examen approfondi des recherches sur les méthodes permettant de réduire les concentrations de particules dans les métros. Ces renseignements peuvent soutenir la prise de décisions éclairées dans le but d'améliorer la qualité de l'air des métros.

Six domaines clés ont été identifiés dans la littérature scientifique comme options pour améliorer la qualité de l'air dans les métros : la ventilation, la filtration, la surveillance de la qualité de l'air, la réduction des émissions de particules dans le métro, l'aspiration et le lavage, et les portes palières. Les recommandations contenues dans le présent document d'orientation sont fondées sur les meilleures données scientifiques disponibles, sans prendre en compte les coûts. De plus, chacune de ces stratégies examinées affiche une efficacité variable selon les stations, les lignes et les réseaux de métro. Avant le déploiement complet des approches décrites dans ce document d'orientation, il faut effectuer des tests pour s'assurer qu'elles sont efficaces une fois implantées.

Les stratégies suivantes peuvent contribuer à l'amélioration de la qualité de l'air dans les métros :

- Contrôler régulièrement la qualité de l'air dans le métro. Cela permet aux gestionnaires des réseaux de métros de comprendre où se trouvent les fortes concentrations de particules et à quel moment elles se produisent, de détecter les variations des concentrations de particules dans le métro et d'élaborer des stratégies pour y améliorer la qualité de l'air;
- Recourir à des systèmes de ventilation mécanique au lieu de compter uniquement sur la ventilation par l'effet piston ou la ventilation naturelle;
- Automatiser et optimiser le fonctionnement du système de ventilation mécanique en fonction de l'horaire des trains et des concentrations de particules mesurées sur les quais et à l'extérieur;
- La filtration à l'intérieur des trains pourrait s'avérer plus efficace pour réduire l'exposition des navetteurs que la filtration sur les quais, étant donné que la réduction des particules à l'échelle d'une station nécessiterait un nombre important d'unités, et que les navetteurs passent la majorité de leur temps à l'intérieur des trains;
- Utiliser des méthodes d'élimination des particules par magnétisme. Cette approche est idéale pour les particules riches en fer que l'on trouve couramment dans les métros;

-
- Réduire l'utilisation des freins à friction et choisir des matériaux de frein plus durables pour contribuer à réduire la production de particules dans le réseau;
 - Réaliser un audit des taux d'usure et de remplacement des composants du métro (tels que les roues, les rails, les matériaux des garnitures de frein, les composants électriques, les lubrifiants et le ballast), ce qui permettra de déterminer d'où proviennent principalement les particules produites dans le métro.

CHAPITRE 1: INTRODUCTION

1.1. RÉSEAUX DE MÉTRO

Partout dans le monde, les réseaux de métro prennent de l'expansion pour combler le besoin d'une mobilité publique durable. Ces réseaux, jumelés à la mise à disposition de transports en commun rapides et intermodaux, favorisent l'augmentation de l'activité physique et diminuent la dépendance aux véhicules privés, réduisant ainsi les émissions et les embouteillages (James et coll., 2014; Li et coll., 2019; Toronto Public Health, 2020; Yang et coll., 2018). Les réseaux de métro peuvent comprendre des installations surélevées, au niveau du sol ou souterraines. Si les lignes souterraines peuvent constituer la forme de métro la plus chère à construire (Association internationale des tunnels et de l'espace souterrain, 2004), elles peuvent être idéales dans les zones très développées d'une ville. Depuis que le premier réseau de métro avec les lignes souterraines a été construit à Londres, au Royaume-Uni, à la fin du XIX^e siècle, le rythme de l'introduction de ces réseaux dans de nouvelles villes ainsi que de leur expansion a augmenté dans le monde entier (Union internationale des transports publics, 2019).

1.1.1. Réseaux de métro au Canada

Six villes canadiennes possèdent un métro, et des expansions sont prévues ou sont en cours dans chacune d'elles. Les réseaux de train léger de Calgary, d'Ottawa et d'Edmonton sont principalement construits au niveau du sol, comptant respectivement une, quatre et six stations souterraines, tandis que les réseaux de Toronto, de Montréal et de Vancouver comportent des lignes en grande partie souterraines. À Vancouver, les lignes de métro souterraines sont situées au cœur du centre-ville et représentent environ 20 % d'un réseau qui est autrement aérien. En comparaison, plus de 80 % du réseau de Toronto est constitué de lignes de métro souterraines, et le métro de Montréal est entièrement souterrain. Ces trois réseaux sont les plus importants au Canada. Les réseaux de Montréal, de Toronto et de Vancouver se classent respectivement aux troisième (1,4 M), quatrième (1,3 M) et neuvième (0,5 M) rangs pour ce qui est du nombre moyen d'embarquements quotidiens en semaine en Amérique du Nord (APTA, 2019). D'après le recensement canadien de 2016, plus de 1,3 million de personnes au Canada utilisent ces trois réseaux de métro pour se rendre quotidiennement au travail (Statistique Canada, 2017).

1.1.2. La pollution de l'air dans les métros

Au cours des 20 dernières années, les recherches visant à caractériser la qualité de l'air dans les métros ont indiqué qu'il pourrait y avoir des concentrations élevées de polluants de l'air dans certains métros. Le débit d'air restreint, combiné à l'émission de particules provenant de l'usure des composants du métro, peut présenter des risques pour la santé lorsque des polluants tels que des particules fines ($PM_{2,5}$) et de grosses particules ($PM_{10-2,5}$) contaminent l'air (COMEAP, 2019; Toronto Public Health, 2020). Il a également été signalé que les concentrations de $PM_{2,5}$ et de $PM_{10-2,5}$ sont

plus élevées dans les métros que dans les environnements extérieurs (Xu et Hao, 2017) et qu'elles sont fortement corrélées (Lovett et coll., 2017), ce qui laisse entendre que leurs sources sont les mêmes. Les composants des métros dont le potentiel d'émission de particules a été étudié comprennent les roues, le matériel de freinage (plaquettes, sabots ou blocs), les rails, le ballast (gravier sous les voies) et les composants porteurs de courant électrique tels que les caténaires (pour les systèmes électriques aériens) et les frotteurs (pour les systèmes d'électrification à troisième rail) [Xu et Hao, 2017].

Bien qu'il ait été estimé que les déplacements en métro constituent 5 % de la journée d'un navetteur (Matz et coll., 2014), ils peuvent contribuer à une part bien plus importante de l'exposition quotidienne aux $PM_{2,5}$ d'un navetteur, en raison des concentrations élevées dans certains métros. Par exemple, une étude de la littérature publiée, menée dans le cadre du projet Improve Life, a fait état de concentrations de $PM_{2,5}$ allant de 10 à 125 $\mu g/m^3$ pour 115 stations (Moreno et de Miguel, 2018). Une autre étude, menée dans le métro de Londres, a fait état de concentrations de $PM_{2,5}$ allant de 39 à 734 $\mu g/m^3$ dans les trains (Saunders et coll., 2019). Une étude portant sur quatre réseaux du nord-est des États-Unis a signalé des concentrations de $PM_{2,5}$ allant d'environ 100 à 800 $\mu g/m^3$ sur les quais (Lugilio et coll., 2021). Les concentrations de $PM_{2,5}$ sur les quais et dans les trains du métro de Shanghai allaient de 50 à 200 $\mu g/m^3$ (Zhao et coll., 2017).

Dans l'Étude sur l'exposition dans les transports urbains (EETU) de Santé Canada, les concentrations sur les quais de métro dans les réseaux de Toronto, de Montréal et de Vancouver ont été estimées à 106, 36 et 40 $\mu g/m^3$, respectivement (Van Ryswyk et coll., 2017). On estime que les trajets en métro dans chacun de ces réseaux représentent de 11 à 21 % de l'exposition quotidienne aux $PM_{2,5}$. Ces résultats sont conformes à des études similaires menées à Helsinki, en Finlande (Aarnio et coll., 2005), à New York, aux États-Unis (Chillrud et coll., 2004) et à Londres, au Royaume-Uni (Seaton et coll., 2005; Saunders et coll., 2019). Dans l'ensemble, ces études montrent que les concentrations de $PM_{2,5}$ dans le métro peuvent contribuer à l'exposition quotidienne des passagers aux $PM_{2,5}$.

1.2. EFFETS DES $PM_{2,5}$ SUR LA SANTÉ

L'exposition aux $PM_{2,5}$ comporte des risques bien établis pour la santé. Bien que l'exposition aux $PM_{10-2,5}$ soit nocive pour la santé humaine, notamment pour la santé respiratoire (Adar et coll., 2014), les $PM_{2,5}$ engendrent une charge de morbidité supérieure. Ces particules d'un diamètre inférieur à 2,5 μm se retrouvent dans l'air et contribuent à la pollution atmosphérique. Leur inhalation est dangereuse pour la santé humaine, car elles peuvent pénétrer profondément dans les poumons et passer dans la circulation sanguine des personnes exposées, ce qui entraîne des effets néfastes comme l'asthme, le cancer du poumon, les maladies coronariennes, les crises cardiaques, les accidents vasculaires cérébraux et la réduction de l'espérance de vie (Santé Canada, 2012; Santé Canada, 2013; Environmental Protection Agency des États-Unis, 2009; Organisation mondiale de la Santé, 2016). À l'heure actuelle, les efforts pour améliorer la qualité de l'air dans les métros ont porté sur la réduction des concentrations de particules et des recherches épidémiologiques sont en cours relativement leur composition unique en métaux.

1.3. RAISON D'ÊTRE ET CHAMP D'APPLICATION

Le présent document a pour objectif d'informer les autorités responsables du transport en commun au Canada quant aux stratégies qui permettraient d'améliorer la qualité de l'air dans leurs réseaux de métro. À cette fin, des techniques d'examen systématique ont été appliquées pour analyser la documentation disponible sur la qualité de l'air dans les métros. La section 3 renferme des renseignements généraux sur la nature de la qualité de l'air dans les métros, ainsi qu'un examen de deux études qui se sont penchées sur la qualité de l'air dans les métros au Canada. Enfin, la section 4 examine les études qui ont évalué les stratégies visant à améliorer la qualité de l'air dans les métros.

Le présent document peut contribuer à l'intégration de considérations relatives à la qualité de l'air dans le cadre décisionnel régissant la gestion d'un réseau de métro. Au fur et à mesure que la recherche sur la qualité de l'air clarifiera les sources, les tendances et les effets sur la santé des particules provenant du métro, la détermination et le maintien de niveaux de qualité de l'air atteignables dans le métro deviendront probablement une priorité pour les gestionnaires des transports en commun.

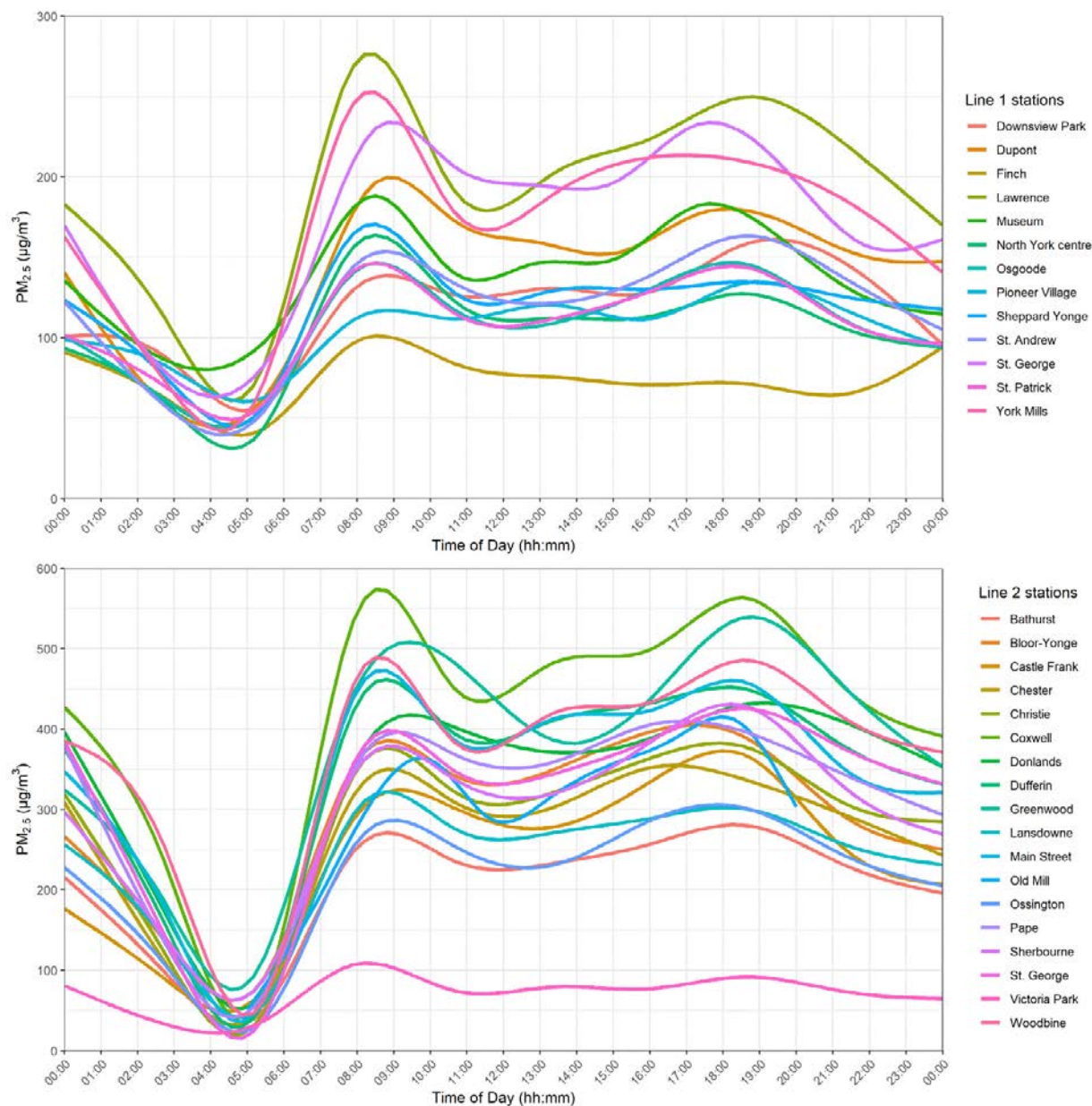
CHAPITRE 2:

LA QUALITÉ DE L'AIR DANS LES MÉTROS

Selon un examen de 2017 sur les études ayant caractérisé la pollution de l'air dans les métros, des conclusions communes sont ressorties de ces études : les particules constituent le principal polluant préoccupant; le fer est l'élément dominant dans les particules en suspension dans l'air; et l'usure mécanique en est la principale source (Xu et Hao, 2017). L'examen s'intéressait aussi aux facteurs internes et externes des réseaux de métro qui sont liés aux concentrations de particules. En ce qui concerne les facteurs internes, des aspects de la conception du réseau, tels que la profondeur de la station/du tunnel, la distance par rapport à une section extérieure de la ligne, la présence de portes palières, l'âge et l'étanchéité du train, le taux de renouvellement et la circulation de l'air, ainsi que l'efficacité des systèmes de ventilation et de filtration de l'air, ont été associés aux niveaux de particules dans le métro. Les facteurs liés à l'utilisation du métro et aux horaires, tels que le temps de service, le nombre de passagers et la fréquence de passage des trains, peuvent également influencer la qualité de l'air d'un métro. En ce qui concerne les facteurs externes, les conditions environnementales telles que la température, l'humidité relative et la pollution ambiante dans l'air extérieur peuvent avoir un impact sur la qualité de l'air du métro, comme en témoignent les changements saisonniers des niveaux de particules dans le métro (Lee et coll., 2016; Martins et coll., 2016; Van Ryswyk et coll., 2017).

La fréquence des trains a une incidence majeure sur les concentrations de particules dans le métro. Il a été démontré invariablement que la fréquence des trains est étroitement liée à la qualité de l'air dans le métro, en raison de l'effet combiné des émissions de particules et de leur remise en suspension. Les études comprenant des campagnes de surveillance des $PM_{2,5}$ dans le métro durant 24 heures sur plusieurs jours ou semaines décrivent un schéma diurne qui reflète la fréquence des trains au cours d'une journée (Song et coll., 2008; Son et coll., 2013; Van Ryswyk et coll., 2021; Saunders et coll., 2019). Les concentrations maximales de particules ont été observées pendant les heures de pointe, avec une diminution jusqu'aux niveaux minimaux pendant les heures creuses (figure 3.1).

FIGURE 3.1: Le schéma diurne des $PM_{2.5}$ sur les quais de métro. Ces données représentent les concentrations de $PM_{2.5}$ pour 13 quais de la ligne 1 et 18 quais de la ligne 2 du métro de Toronto (Van Ryswyk et coll., 2021).



2.1. SOURCES DE PARTICULES DANS LES MÉTROS

Une technique courante dans les études portant sur les sources de particules en suspension dans l'air des métros consiste à recueillir ces particules sur des filtres. Grâce à diverses méthodes d'identification chimique, la composition élémentaire des particules peut être déterminée et analysée pour en déterminer les sources et estimer leurs contributions relatives. Ces analyses de répartition des sources sont utiles pour définir la proportion de particules du métro qui provient de l'air extérieur et la proportion qui provient du réseau lui-même. Les études sur la répartition des sources de pollution atmosphérique dans les métros ont estimé que de 30 % à 91 % des $PM_{2,5}$ du métro proviennent de l'exploitation du réseau (Kang et coll., 2008; Minguillón et coll., 2018; Park et coll., 2014a; Huang et coll., 2021). L'examen des ratios des paires d'éléments confirme que les composants du métro sont une source de particules. Par exemple, une étude menée dans le métro de la ville de New York a révélé que le rapport manganèse/fer (Mn:Fe) dans les particules était le même dans presque tous les échantillons de particules prélevés et correspondait au ratio Mn:Fe contenu dans l'acier (Chillirud et coll., 2004). Un ratio Mn:Fe similaire a été observé dans les $PM_{2,5}$ échantillonnées dans les réseaux canadiens (Van Ryswyk et coll., 2017). L'origine de ces particules est attribuée aux émissions provenant de la friction mécanique entre les freins, les roues, les rails et les composants électriques du train (Aarnio et coll., 2005; Eom et coll., 2013; Johansson et Johansson, 2003; Moreno et coll., 2015; Van Ryswyk et coll., 2017; Namgung et coll., 2016). Le principal composant des particules d'un métro est généralement le fer, qui peut représenter plus de 50 % de la masse totale des particules (Bachoual et coll., 2007; Minguillón et coll., 2018; Loxham et coll., 2013; Cusack et coll., 2015; Lee et coll., 2018; Kim et coll., 2010; Park et coll., 2014a; Luglio et coll., 2021; Van Ryswyk et coll., 2021; Smith et coll., 2020).

Par ailleurs, les particules trouvées dans les métros affichent souvent une forte teneur en carbone. La composante carbonée provient probablement des freins des trains et des composants électriques tels que les caténaires, les pantographes et les frotteurs, qui sont généralement à base de carbone (Querol et coll., 2012; Moreno et coll., 2015; Minguillón et coll., 2018). Les autres métaux présents dans les réseaux de métro sont l'arsenic, le baryum, le cadmium, le chrome, le cobalt, le manganèse, le nickel, l'argent, le strontium, le titane et le zirconium (Figueroa-Lara et coll., 2019; Luglio et coll., 2021; Martins et coll., 2015; Van Ryswyk et coll., 2017).

L'examen de la morphologie et de l'état d'oxydation des particules s'est aussi avéré utile pour caractériser la source et la formation des particules dans les métros. Une analyse des particules aéroportées dans le métro de Barcelone, réalisée par microscopie électronique à balayage et microscopie électronique à transmission, a permis d'établir que les particules avaient tendance à être planes et en forme de flocons, et qu'elles étaient fortement oxydées, ce qui laisse entendre que leur formation est attribuable à des processus de friction à haute température (Jung et coll., 2012; Moreno et coll., 2015, 2017a). Des analyses d'images de particules émises dans le cadre d'études en laboratoire sur la poussière des freins de métro ont également relevé des formes non sphériques (Namgung et coll., 2016; Namgung et coll., 2017). L'examen de la distribution de la taille des particules en suspension dans l'air sur les quais a également révélé que les activités d'exploitation du métro contribuaient à la libération de particules. Sur un quai du métro de Stockholm, une grande variété de tailles de particules a été mesurée à une haute résolution temporelle. Ces données ont permis de définir trois sources : l'usure mécanique liée aux voies ferrées, la suspension causée par le mouvement des trains et les étincelles provenant des composants électriques (Cha et coll., 2018).

2.2. PM_{2,5} DANS LES MÉTROS CANADIENS

Afin d'étudier la qualité de l'air dans les métros canadiens, Santé Canada a mené l'EETU de 2010 à 2013 à Vancouver, à Toronto et à Montréal. Cette étude comprenait la surveillance des sections souterraines et en surface, y compris l'environnement des trains et des quais, en été et en hiver, pendant les heures de pointe des trajets domicile-travail (de 7 h à 10 h et de 15 h à 18 h). D'après ces résultats, le réseau de Vancouver présentait les plus faibles concentrations de PM_{2,5} (24 µg/m³), suivi de celui de Montréal (38 µg/m³) et de Toronto (111 µg/m³) [Van Ryswyk et coll., 2017]. Les faibles concentrations de PM_{2,5} à Vancouver ont été attribuées au fait qu'environ 80 % du réseau de métro est conçu en surface, où l'air libre permet la dispersion et la dilution des particules produites par les activités. De même, pour Vancouver, des concentrations plus élevées de PM_{2,5} ont été observées dans les sections souterraines situées au centre-ville, où la dispersion ou le mélange avec l'air ambiant étaient moindres comparativement aux sections en surface. En revanche, le métro de Montréal est entièrement souterrain, tandis que celui de Toronto l'est à environ 80 %. Les réseaux de Montréal et de Toronto sont similaires pour ce qui est de la longueur et de la capacité des trains, de la profondeur des stations, de la longueur du réseau et de la fréquentation, mais ils se distinguent par la composition des éléments du métro. Plus précisément, le réseau de Montréal utilise des roues en caoutchouc, des pistes de roulement en béton et des sabots de frein en bois, alors que ces composants (roues, rails et sabots de frein) sont en métal à Toronto, ce qui entraîne la production de beaucoup plus de poussière d'acier. Selon l'analyse élémentaire des PM_{2,5} provenant de ces réseaux, les PM_{2,5} de Montréal contenaient une plus faible proportion de fer (5 %) que celles de Toronto (50 %).

La différence de concentration de PM_{2,5} entre les métros de Montréal et de Toronto peut probablement aussi être attribuée à des pratiques de ventilation différentes. Bien que les deux réseaux soient dotés d'une ventilation mécanique, à Montréal, le système de ventilation fonctionne en continu à des fins de réduction de la chaleur (Société de transport de Montréal [STM], 2012). Il est possible de déterminer quels sont les impacts sur la qualité de l'air d'une ventilation de refroidissement continue en examinant la saisonnalité des PM_{2,5} dans chaque réseau et en considérant que le refroidissement nécessiterait plus de ventilation en été. Dans le métro de Montréal, les concentrations de PM_{2,5} étaient plus faibles en été (26 µg/m³) qu'en hiver (47 µg/m³). Cette différence saisonnière dépasse de loin la différence correspondante observée pour les PM_{2,5} extérieures à Montréal. Dans le réseau de Toronto, la saisonnalité était également évidente; toutefois, les concentrations étaient plus élevées en été (120 µg/m³) qu'en hiver (82 µg/m³). Cela tend à montrer qu'à Toronto, la ventilation mécanique est utilisée dans une moindre mesure pour le contrôle de la température. Plusieurs études européennes portant sur des métros munis de systèmes de ventilation fonctionnant en continu ont également relevé des niveaux de particules plus faibles en été (Branis, 2006; Martins et coll., 2015).

Des analyses visant à vérifier les associations entre les PM_{2,5} dans le métro et les facteurs du réseau ont été effectuées dans le cadre de l'EETU. Ces analyses ont été stratifiées en fonction des sections souterraines (c.-à-d. métros) et en surface de chaque réseau. Les résultats pour les portions souterraines de chaque réseau sont présentés dans le tableau 3.1. Les liens entre les PM_{2,5} dans le métro et les facteurs comme la distance par rapport à l'extérieur, la profondeur de la station et l'élévation étaient similaires pour les métros de Toronto et de Vancouver. Les PM_{2,5} dans le réseau de Montréal n'affichaient aucun lien avec l'élévation ou la profondeur de la station. Lorsqu'on examine la variation des PM_{2,5} dans chaque réseau (voir les figures A1, A2 et A3 de l'annexe A pour Toronto,

Montréal et Vancouver, respectivement), les sections de métro de Toronto et de Vancouver se distinguent par leurs niveaux de $PM_{2,5}$ plus élevés. Des variations substantielles des niveaux de $PM_{2,5}$ ont été constatées dans l'ensemble des réseaux de métro. Cependant, le métro de Montréal présentait des niveaux de $PM_{2,5}$ plus constants dans l'ensemble du réseau, qui est entièrement souterrain.

TABEAU 3.1 : Estimation des associations entre les $PM_{2,5}$ et les facteurs du réseau de métro

Facteurs liés au réseau	Toronto		Montréal		Vancouver	
	% de changement	IC à 95 %	% de changement	IC à 95 %	% de changement	IC à 95 %
Aires d'attente ou à bord	61	46 à 77	NS	-	61	40 à 84
Distance jusqu'à l'extérieur (km)	6	4 à 9	NS	-	9	1 à 17
Profondeur de la station (dizaines de mètres)	NS	-	NS	-	33	20 à 47
Élévation (dizaines de mètres)	3	6 à 1	NS	-	8	11 à 5
Âge lors de l'échantillonnage (décennies)	9	3 à 1	3	5 à 1	NS	-

D'après Van Ryswyk et coll., 2017, tableau 4. N = non significatif

L'objectif principal de l'EETU était d'examiner la proportion des $PM_{2,5}$ quotidiennes attribuable au transport quotidien en métro. Elle a été évaluée à 21 % pour Toronto et à 11 % pour Montréal et Vancouver. Dans une étude de suivi concernant le réseau de métro de Toronto, l'Étude de la qualité de l'air dans le métro (EQAM; 2018-2020) de Santé Canada a permis de constater que la qualité de l'air s'était améliorée depuis la réalisation de l'EETU (Van Ryswyk et coll., 2021). La réduction des $PM_{2,5}$ a été associée à plusieurs changements et améliorations apportés au réseau de métro. Sur la ligne 1, tous les trains ont été remplacés par des modèles plus récents, ce qui a amélioré de 30 % le taux de $PM_{2,5}$ par rapport à l'étude précédente (EETU). Cette baisse des $PM_{2,5}$ a été observée sur l'ensemble des treize quais de la ligne 1 inclus dans l'étude. En ce qui concerne la ligne 2, une hausse d'environ 50 % du niveau de $PM_{2,5}$ a été initialement observée sur les 18 quais inclus dans l'étude. Elle a été attribuée à une augmentation du nombre de roues comportant des méplats sur la ligne 2 (TTC, 2019; Wong, 2019), causée par un taux élevé d'utilisation des freins à friction. Une fois ce problème résolu, une réévaluation des concentrations de $PM_{2,5}$ de la ligne 2 a révélé une réduction marquée des $PM_{2,5}$, qui ont atteint des niveaux inférieurs à ceux observés en 2011. Les effets des nouveaux trains introduits sur la ligne 1 ainsi que la fréquence réduite d'utilisation des freins sur la ligne 2 ont mis en évidence les impacts potentiels de la conduite des activités sur la qualité de l'air dans le métro.

Selon l'EQAM, au bout d'un an d'exploitation, les six stations ajoutées lors du prolongement de la ligne 1 (achevé en 2017, juste avant le début de l'étude) présentaient des taux de $PM_{2,5}$ similaires à ceux des stations voisines, plus anciennes. Les sections souterraines les plus anciennes et les plus récentes étant séparées par une section en surface de 5 km, il était impossible que les $PM_{2,5}$ de la section la plus ancienne soient transportées à la section la plus récente. Par conséquent, les $PM_{2,5}$ dans la section la plus récente étaient attribuables aux émissions récentes et non à la remise en suspension des poussières accumulées pendant des décennies d'exploitation. Cela suggère également que les $PM_{2,5}$ de la section la plus ancienne avaient principalement été émises récemment. En outre, l'étude a évalué l'utilisation d'un aspirateur sur rails pour améliorer la qualité de l'air dans le réseau. Cet aspirateur était utilisé la nuit, après les heures d'ouverture afin d'éliminer la poussière accumulée. Si l'aspirateur sur rails a permis d'éliminer les débris susceptibles de provoquer des incendies de voie, il n'a eu aucun effet sur les concentrations de $PM_{2,5}$ sur le quai.

Dans l'ensemble, les résultats de l'EQAM donnent à penser que les mesures visant à réduire les émissions (p. ex. trains plus récents et diminution de l'utilisation des freins à friction et roues comportant des méplats) sont plus efficaces pour réduire les concentrations de $PM_{2,5}$ que pour éliminer la poussière accumulée. Ces observations permettent de croire que les interventions en matière de qualité de l'air qui visent à réduire les émissions à la source (comme la réduction du taux de production de poussière des roues, des rails et des freins) pourraient être plus efficaces que celles qui favorisent l'élimination des particules, comme les méthodes d'aspiration et de lavage.

CHAPITRE 3:

STRATÉGIES DE RÉDUCTION DES CONCENTRATIONS DE PM_{2,5} DANS LES MÉTROS

Plusieurs des études récentes sur les stratégies de réduction des concentrations de PM_{2,5} établissent des interactions entre l'exploitation du métro et la qualité de l'air. Des études ont porté sur un certain nombre de facteurs, tels que la ventilation des quais et des tunnels, l'installation de portes palières, l'application d'une filtration sur les quais et dans les trains, l'utilisation d'aspirateurs sur rails, le lavage des tunnels et le freinage, afin de déterminer leur impact sur les concentrations de particules dans le métro (Park et coll., 2018). Par exemple, le projet Improve Life, mené par le groupe de recherche sur la qualité de l'air du conseil espagnol de la recherche et la société de transport en commun de Barcelone, a étudié la relation entre les concentrations de particules dans le métro et les facteurs du réseau. Ces recherches ont été publiées dans plusieurs articles et sont résumées dans un guide technique destiné aux sociétés de transport en commun (Moreno et coll., 2017c). Le réseau de métro de Séoul (RMS), en République de Corée, a fait l'objet de nombreuses études sur la qualité de l'air. Ces études menées par des chercheurs des universités de Kyung Hee, Inha et Konkuk ont examiné l'impact de la filtration magnétique et électrostatique et des réseaux de surveillance avancés. Leurs travaux comprennent les seules études longitudinales évaluant l'impact de l'installation de portes palières sur les concentrations de particules dans les trains et sur les quais. Un projet concerté visant à améliorer la qualité de l'air a aussi été mené dans le réseau de métro de Londres, au Royaume-Uni (TfL, 2013; TfL, 2017) grâce à un partenariat entre Transport for London (l'autorité municipale de transport de Londres) et le King's College de Londres (Saunders et coll., 2019; Smith et coll., 2020). De même, l'EETU de Santé Canada a été réalisée en collaboration avec les sociétés de transport en commun de Vancouver, de Toronto et de Montréal. Elle a servi de fondement à la conception de l'EQAM, qui s'est penchée sur l'impact du nouveau matériel roulant, de l'aspiration sur rails et de la fréquence du freinage par friction sur la qualité de l'air dans le métro. Le corpus de recherche sur les interventions en faveur de la qualité de l'air dans les métros comprend également des réseaux d'autres pays tels que le Brésil, le Mexique, les États-Unis, la France, l'Angleterre, la Finlande, la Grèce, la Suède, les Pays-Bas, l'Italie et la Chine.

Voici un examen de ces recherches dans six domaines, à savoir la ventilation, les portes palières, la filtration, l'aspiration et le lavage, et le freinage. Chaque section se termine par quelques points qui résument les résultats des études. Une dernière section est ensuite consacrée à la recherche sur la surveillance de la qualité de l'air dans les métros.

3.1. VENTILATION

L'échange d'air entre le métro et l'espace extérieur peut se faire par l'entremise d'une ventilation naturelle, par l'effet piston ou mécanique. La ventilation naturelle dépend d'un certain nombre de facteurs, dont les facteurs météorologiques, la gravité, la présence de cages d'escalier et de puits de ventilation ou de décompression, ainsi que la température, l'humidité et la densité de l'air du métro par rapport à celles de l'air extérieur (Brüne et coll., 2012). Le renouvellement de l'air assuré par la ventilation naturelle est limité dans les réseaux de métro (Wen et coll., 2020). Les espaces libres à l'intérieur des métros peuvent être relativement isolés de l'air extérieur en l'absence d'autre type de ventilation (Brüne et coll., 2012).

La ventilation par l'effet piston consiste à faire circuler l'air dans des puits de ventilation par l'entremise du mouvement des trains. Lorsqu'un train traverse un tunnel, une zone de haute pression se forme devant le train et une zone de basse pression derrière celui-ci. Par conséquent, l'air est forcé vers le haut des puits de ventilation à l'approche du train, tandis que l'air extérieur est ensuite tiré vers le bas du puits au passage du train. Les puits de ventilation des tunnels sont répartis dans l'ensemble des réseaux de métro, généralement à proximité des quais, où ils permettent d'équilibrer la pression lorsque les trains arrivent. Ils diffèrent en hauteur, les sections plus profondes d'un métro étant munies de puits de ventilation plus longs. Par conséquent, l'effet piston dû au mouvement des trains (lequel est stable dans l'ensemble du réseau) fournira une ventilation moindre dans les sections plus profondes. Les puits de ventilation des tunnels peuvent également servir à disperser la chaleur émanant des condenseurs des climatiseurs de trains (Zhao et coll., 2021). La plupart des études qui ont examiné le potentiel de la ventilation par l'effet piston pour assurer le renouvellement de l'air sont de nature théorique ou qualitative (Pan et coll., 2013).

Les systèmes de ventilation mécanique (SVM) sont constitués de ventilateurs à commande mécanique situés dans les puits de ventilation des tunnels et des quais de l'ensemble du réseau. Tous les métros canadiens sont équipés d'un SVM, conformément au code de sécurité 130 de la National Fire Protection Association au Canada (NFPA 130, *Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems* [National Fire Protection Association, 2020]). L'objectif principal des SVM consiste à réduire les risques associés au dégagement de fumée lors de situations d'urgence. Ils servent aussi à ventiler des portions du réseau pendant les activités de maintenance qui créent beaucoup de poussières (p. ex. le meulage des rails). Enfin, ils assurent la climatisation. Lorsque la température dans une zone donnée du métro atteint une valeur seuil, le SVM est activé et introduit de l'air frais de la surface qui déplace l'air plus chaud du métro. Le recours au SVM à des fins de refroidissement peut varier considérablement d'un réseau à l'autre. Dans les métros qui sont largement ou complètement fermés, comme celui de Montréal, ou qui se trouvent dans des climats plus chauds, il se peut que le SVM doive fonctionner constamment afin d'assurer le confort thermique des passagers. Le fonctionnement continu du SVM à des fins de refroidissement est courant dans un certain nombre de réseaux, notamment à Montréal, au Canada (STM, 2012), à Séoul, en République de Corée (Song et coll., 2008), à Barcelone, en Espagne (Moreno et coll., 2014; Moreno et coll., 2017b) et à Chongqing, en Chine (Zhao et coll., 2021). Les avantages d'un échange accru entre l'air du métro et l'air extérieur sont mis en évidence par les études rapportant que la qualité de l'air des quais de métro s'améliore à mesure qu'on se rapproche des sections en surface (Martins et coll., 2016; Reche et coll., 2017; Van Ryswyk et coll., 2017; Saunders et coll., 2019). L'utilisation continue de la ventilation mécanique contribue à réduire les concentrations de particules par rapport aux concentrations obtenues lorsque la ventilation naturelle ou la ventilation par l'effet

piston sont employées seules (Martins et coll., 2015; Moreno et coll., 2014; Son et Ryu, 2018). La ventilation des tunnels a été mise en œuvre dans le RMS et a permis de réduire les niveaux de PM_{10} en dessous de la norme coréenne de qualité de l'air intérieur (Son et coll., 2013).

Les résultats d'études sur l'incidence des protocoles de ventilation dans le métro de Barcelone ont révélé que le fonctionnement coordonné du SVM dans les tunnels et sur les quais était susceptible d'améliorer le taux de particules dans les tunnels à voie unique du métro, tout en ayant peu d'effet sur les quais à double voie (Moreno et coll., 2014; Moreno et coll., 2017b). Ces études ont évalué l'effet de la ventilation des quais de l'extérieur vers l'intérieur ou de l'expulsion de l'air des quais vers l'extérieur (impulsion/expulsion). Les auteurs de l'étude ont souligné que lorsque la ventilation du quai était réglée sur l'expulsion, les niveaux de particules sur le quai augmentaient. Cette hausse a été attribuée au fait que l'expulsion de l'air du quai attirait l'air du tunnel, contenant des concentrations élevées de particules, vers les quais. On a également constaté que l'augmentation de la vitesse du ventilateur (puissance plus élevée) réduisait la concentration des particules sur le quai.

L'utilisation continue de la ventilation mécanique peut augmenter les coûts d'exploitation. Ainsi, une évaluation d'une station représentative du métro de Barcelone (qui dispose d'une ventilation mécanique continue) a révélé que dans cette station, environ 14 % de la consommation d'énergie non liée à la traction était attribuable au système de ventilation mécanique (Casals et coll., 2014).

Entre 2013 et 2021, le département des sciences et de l'ingénierie environnementales du collège de génie de l'université Kyung Hee (République de Corée) a publié une série d'articles de modélisation qui évaluaient les méthodes d'optimisation du système de ventilation d'une station de métro dans le RMS (Liu et coll., 2013; Lee et coll., 2015; Kim, G. S., et coll., 2016; Kim, M.J., et coll., 2016; Li et coll., 2019; Loy-Benitez et coll., 2018; Loy-Benitez et coll., 2021). Chaque simulation a utilisé une combinaison d'intrants, notamment l'horaire des trains, le nombre d'usagers, la température, l'humidité relative et les PM_{10} sur le quai et à l'extérieur, dans le but de trouver la vitesse optimale du ventilateur qui maintiendrait les niveaux de PM_{10} dans le métro en dessous de la norme coréenne existante pour les PM_{10} dans l'air intérieur (KMOE, 2005; KMOE, 2020). Ces études de modélisation ont révélé qu'une diminution de la consommation d'énergie allant de 4 à 36 % était possible sans réduction de la qualité de l'air du quai. L'utilisation de systèmes fondés sur l'intelligence artificielle pour optimiser la ventilation et limiter les coûts a également fait l'objet d'études axées sur la possibilité d'accroître l'efficacité du recours à la ventilation (Heo et coll., 2019; Kim et coll., 2015; Loy-Benitez et coll., 2020).

Les gestionnaires des réseaux peuvent par ailleurs souhaiter aller au-delà d'une simple analyse de la consommation d'énergie de leur système de ventilation et considérer les avantages sociétaux potentiels d'une ventilation accrue et d'une meilleure qualité de l'air dans le métro. Une étude sur le RMS comprenait une analyse coûts-avantages qui allait au-delà de l'électricité nécessaire au fonctionnement du système de ventilation des tunnels. Elle incluait les coûts d'investissement liés au remplacement des ventilateurs à vitesse fixe par des ventilateurs à vitesse variable, le coût de fonctionnement et d'entretien des nouveaux ventilateurs, ainsi que les avantages sociaux de l'amélioration de la qualité de l'air dans le métro en ce qui concerne la santé, la réduction de la quantité de combustibles fossiles brûlés pour produire de l'électricité et la réduction des émissions de CO_2 (Quan et coll., 2018). Les économies estimées (incluant les investissements, les aspects mécaniques et les aspects sociaux) ont été chiffrées à 263 602 \$ US par station sur 30 ans.

Résumé

- Au Canada, des SVM sont installés dans l'ensemble des réseaux de métro, conformément à la loi, puisqu'ils assurent la ventilation lorsqu'une situation d'urgence entraîne un dégagement de fumée. Ils permettent également la régulation des conditions ambiantes afin de réduire l'accumulation de chaleur. Généralement, les réseaux qui requièrent un refroidissement constant comptent moins de particules durant les mois d'été. En comparaison, les SVM ne sont pas fréquemment utilisés dans les systèmes qui ont un faible besoin de refroidissement.
- L'utilisation d'un SVM peut améliorer la qualité de l'air du métro par rapport à la seule ventilation naturelle ou par l'effet piston. Toutefois, son efficacité peut dépendre de facteurs de conception en lien avec le volume de la station.
- Chaque quai peut avoir des réglages uniques, en ce qui a trait à la vitesse du ventilateur et à la direction du flux dans les tunnels et les événements du quai, pour améliorer la qualité de l'air du quai.
- Les gestionnaires du RMS ont eu recours à la ventilation mécanique pour se conformer aux normes de qualité de l'air intérieur concernant les $PM_{2,5}$ et les PM_{10} .
- Grâce à l'automatisation et à l'optimisation des systèmes de ventilation mécanique au moyen d'intrants modélisés (p. ex. les horaires des trains, les concentrations mesurées de particules sur les quais et à l'extérieur), il est possible de réduire les coûts énergétiques supplémentaires.

3.2. PORTES PALIÈRES

Les portes palières sont des barrières physiques situées au bord des quais de métro; elles s'ouvrent et se ferment en même temps que celles des trains. Les portes palières complètes vont du sol au plafond, séparant efficacement les espaces libres du quai et des voies. Elles peuvent prévenir les suicides tout en améliorant la consommation d'énergie et la régulation de la température (Abdurrahman et coll., 2018). Dans plusieurs études, il a été constaté que les stations dotées de portes palières complètes présentaient des niveaux de particules plus faibles sur les quais que les stations sans portes palières (Jung et coll., 2010; Moreno et coll., 2014; Pang et coll., 2020; Reche et coll., 2017; Son et coll., 2014a).

Une série d'études menées dans le RMS a mis en lumière l'effet de l'installation de portes palières sur les concentrations de particules sur les quais et dans les trains. Ces études donnent un aperçu unique de la relation entre les portes palières et la qualité de l'air du métro, car elles présentent des données sur les particules avant et après l'installation de portes palières dans l'ensemble du RMS. La première étude a examiné l'effet de l'installation de portes palières sur un quai et a signalé une baisse des niveaux de PM_{10} sur le quai après l'installation (Kim et coll., 2012). Cependant, aucun effet n'a été observé pour ce qui est des $PM_{2,5}$. Une étude ultérieure a consisté à prélever des échantillons de $PM_{2,5}$ et de PM_{10} dans les trains des huit lignes. Les données ont été recueillies tout au long du printemps 2008 (avant l'installation) et en 2010 (après l'installation). Globalement, les PM_{10} à l'intérieur des trains ont augmenté de 30 % (Son et coll., 2014a). Comme dans l'étude propre au quai, aucun effet n'a été observé sur les $PM_{2,5}$. Des recherches ultérieures qui ont surveillé les $PM_{2,5}$ et les PM_{10} à l'intérieur et à l'extérieur des cabines de métro sur cinq lignes du RMS ont conclu que l'infiltration de $PM_{2,5}$ des tunnels vers les trains avait augmenté après l'installation de portes palières (Lee et coll., 2016). Il a également été constaté que les niveaux de radon avaient augmenté dans les trains (Jeon et

coll., 2012). Dans l'ensemble, ces résultats laissent entendre que l'installation de portes palières limite le déplacement des particules provenant du métro des tunnels vers les quais, augmentant ainsi les concentrations de particules dans les tunnels et dans les trains.

Résumé

- Comme les portes palières constituent une barrière physique entre le quai et la zone des rails, elles ont été installées dans de nombreux réseaux en tant que moyen d'améliorer la sécurité.
- Il a été démontré de façon constante qu'elles diminuent les concentrations de particules sur les quais en limitant le flux d'air depuis les zones de circulation des trains (où les particules sont générées dans le métro) vers les espaces libres des quais.
- D'après les résultats d'une série d'études menées dans le RMS, à la suite de l'installation de portes palières, les niveaux de particules diminuent sur les quais, mais augmentent dans les tunnels et les trains.

3.3. FILTRATION

Plusieurs recherches ont montré que la filtration peut réduire les concentrations de particules dans les rames de métro et sur les quais. Bien que ces travaux soient généralement limités par le petit nombre de trains ou de quais examinés, la courte durée des études ou les conditions de laboratoire employées, ils fournissent de précieux renseignements sur la gamme d'approches explorées en vue de capter et d'éliminer les particules des métros. On y trouve aussi plusieurs approches hybrides novatrices d'élimination des particules.

Une étude menée sur un quai du métro parisien a fait état d'une réduction à la source de 41 % des $PM_{2,5}$ au quai grâce à un précipitateur électrostatique (Tokarek et Bernis, 2006). Après un an de fonctionnement, on avait constaté une réduction de 15 % de l'efficacité de la filtration, ce qui a conduit les auteurs à souligner la nécessité de nettoyer périodiquement les filtres. Le précipitateur électrostatique a été pesé et il s'est avéré qu'il avait collecté environ trois grammes de poussière par jour. D'après ce taux d'accumulation de poussières, un volume de station de 8 000 m³ et un taux de renouvellement d'air de quatre changements par heure pendant 20 heures par jour (ventilation par l'effet piston uniquement, les échanges d'air n'ayant donc lieu que pendant le fonctionnement du métro), les auteurs ont estimé qu'environ 20 unités seraient nécessaires pour réduire la concentration de $PM_{2,5}$ de la station de 230 µg/m³ à 135 µg/m³ (soit une réduction de 50 %).

Les filtres électrostatiques, qui sont de minces filtres en fibres chargés électriquement, ont fait l'objet de plusieurs études en laboratoire et sur le terrain. Un filtre électrostatique à faisceaux de fibres a été évalué sur un quai du RMS. Les concentrations de particules ont été surveillées directement en amont (avant) et en aval (après) de la filtration. Le filtre électrostatique à faisceaux de fibres a démontré une efficacité maximale de 50 % d'élimination des particules à un débit de 2,5 m/s et une chute de pression de 150 Pa (Jo et coll., 2012). L'ajout d'un filtre électret (électrostatique) aux filtres en fibres classiques a amélioré l'efficacité du dépoussiérage du métro d'environ 10 % sans augmenter de manière importante la résistance à l'écoulement (Li et Jo, 2010).

Des méthodes d'élimination qui utilisent le magnétisme pour attirer et capter les particules ont été proposées, compte tenu des propriétés ferromagnétiques des particules du métro. On a estimé que l'intensité du champ magnétique des $PM_{2,5}$ du métro était deux fois plus importante que celle des $PM_{2,5}$ extérieures à Pékin (Cui et coll., 2016). En laboratoire, un treillis tissé en acier inoxydable doté d'aimants permanents a été utilisé pour filtrer les particules fines de la poussière recueillie dans un métro (Choi et coll., 2018). Cette étude a porté sur l'efficacité de la filtration à différentes intensités de champ magnétique et a révélé que l'efficacité de captage maximale était de 7,4 %. L'installation de filtres magnétiques dans les ouvertures des ventilateurs a été testée dans un système de ventilation par extraction sur un quai de métro (Son et coll., 2014b). Les chercheurs ont conclu que l'augmentation de la vitesse du ventilateur et du nombre de filtres magnétiques augmentait l'efficacité de l'élimination des PM_{10} (52 %), des $PM_{2,5}$ (46 %) et des PM_1 (38 %). Bien que les résultats de l'étude visaient à limiter la fuite des particules du métro dans l'air ambiant par les systèmes de ventilation mécanique, ils montrent l'intérêt de la filtration magnétique vis-à-vis des particules du métro. Dans une étude de suivi, l'efficacité de la filtration magnétique a été évaluée sur un quai du RMS (Son et coll., 2019). L'approche de filtration hybride employait deux mécanismes pour le captage des particules : un filtre magnétique pour les particules contenant du fer (magnétiques) et un filtre en cascade (dont le fonctionnement repose sur l'impact par inertie) pour les particules non magnétiques. Les résultats ont montré qu'il était plus efficace d'utiliser les deux types de filtres en série que deux filtres magnétiques seuls. L'efficacité de la filtration des PM_{10} a été estimée à 47 % pour la filtration hybride magnétique et en cascade, contre 37 % pour la filtration magnétique seule.

Plusieurs études ont démontré que les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation des trains pouvaient réduire les concentrations de particules dans les trains (Querol et coll., 2012; Xu et coll., 2016; Ren et coll., 2022). La possibilité d'utiliser des systèmes de filtration innovants dans les trains a été évaluée dans le RMS (Kim et coll., 2014). Des filtres à rouleaux électrostatiques avec renouvellement automatique des filtres ont été installés sur les plafonds des cabines de quatre trains. Le purificateur d'air pour cabine de métro (PACM) comprenait le renouvellement du filtre lorsque la contre-pression atteignait un niveau critique signalant qu'il fallait remplacer le filtre. L'efficacité du PACM a été évaluée en comparant les concentrations de $PM_{2,5}$ et de PM_{10} dans les quatre cabines de train qui en étaient dotées à une cabine de référence adjacente. Les données de quatre périodes de pointe du matin (environ 80 minutes chacune) ont été utilisées pour évaluer l'efficacité de ce dispositif. Ces enquêtes ont été menées sur la ligne 2 ($n = 2$) et la ligne 5 ($n = 2$). Bien que les auteurs ont signalé des diminutions des taux de $PM_{2,5}$ et de PM_{10} , aucune méthode statistique n'a été utilisée pour valider et estimer l'effet du PACM. Cependant, selon les graphiques de séries chronologiques présentés dans l'article publié, les concentrations de $PM_{2,5}$ et de PM_{10} sont plus faibles dans la cabine du train avec PACM. Ces niveaux de particules plus faibles dans les cabines munies du PACM (comparativement aux voitures non équipées) se sont maintenus tout au long des séances de surveillance de 80 minutes. Cela tend à montrer qu'avec plus de données et une analyse statistique appropriée des séries chronologiques, l'efficacité de ce système de filtration pourrait être estimée et jugée suffisante.

Une autre série d'études dans le RMS a examiné la possibilité d'utiliser le mouvement des trains pour activer des dispositifs de collecte de particules installés sous les rames de métro. Il est possible d'améliorer l'efficacité de la filtration en plaçant des filtres à air dans ces zones de fortes concentrations de particules et à proximité d'une source importante de leur production. Une étude sur la circulation de l'air et le comportement des particules autour des trains a révélé que la plus forte

concentration de particules se retrouvait sous la voiture de métro pendant le fonctionnement (Lee et coll., 2016). Ces conclusions ont été appliquées dans une étude qui a utilisé un dépoussiéreur à chicane couplé à un ventilateur d'appoint monté sous le train (Sim et coll., 2018). Alors qu'un essai du dispositif a été réalisé en conditions réelles pour mesurer le débit d'air à différentes vitesses de train, l'efficacité de la filtration a été évaluée en laboratoire (soufflerie). Le système de filtration a pu maintenir une vitesse d'entrée constante à toutes les vitesses du train. L'efficacité de la filtration a été évaluée à 50 % pour une taille de particule de 7,8 μm . Une étude ultérieure a combiné l'approche du dépoussiéreur à chicane avec un précipitateur électrostatique dans un seul système (Woo et coll., 2019). Étant donné que le précipitateur électrostatique fonctionne le plus efficacement à faible vitesse et le dépoussiéreur à chicane à grande vitesse, cette conception hybride maximiserait la collecte des particules lorsque les trains sont dans les gares (faible vitesse) et dans les tunnels (grande vitesse). À des vitesses d'entrée supérieures à 2 m/s, les auteurs ont pu recueillir entre 88 et 123 $\mu\text{g/s}$ de PM_{10} et 30 à 35 $\mu\text{g/s}$ de $\text{PM}_{2,5}$.

Résumé

- Des études sur la filtration des particules sur les quais ont démontré que les technologies de filtration peuvent capter efficacement les particules dans le métro. Cependant, l'utilisation de ces technologies pour réduire le niveau de particules dans toute la station nécessiterait un certain nombre d'unités, en particulier dans les grandes stations à double voie.
- Grâce aux propriétés ferromagnétiques des particules du métro, il est possible d'améliorer l'efficacité de la filtration par l'emploi de méthodes d'élimination fondées sur le magnétisme.
- Étant donné que les espaces libres sont plus réduits dans les trains que sur les quais et que les usagers du métro passent la plupart de leur temps dans les trains, il peut être préférable d'axer la filtration sur l'environnement intérieur des trains.

3.4. ASPIRATION ET LAVAGE

Plusieurs études ont révélé que les concentrations de particules sur les quais augmentent avec l'âge de la station (Moreno et coll., 2014; Martins et coll., 2016; Van Ryswyk et coll., 2017). On a suggéré que ces associations positives entre les concentrations de particules et l'âge du réseau sont attribuables au fait que les stations récentes sont généralement plus vastes et dotées de systèmes de ventilation modernes et de portes palières. La possibilité d'une plus grande accumulation de poussière dans les stations plus anciennes a également été envisagée (Nieuwenhuijsen et coll., 2007). En raison de l'accumulation de poussière ancienne, il y aurait plus de poussière disponible pour une remise en suspension par le mouvement des trains. En tant que telle, la poussière ancienne pourrait constituer une proportion substantielle des particules du métro.

Des stratégies d'élimination de la poussière ancienne ont été étudiées dans plusieurs réseaux. L'impact du lavage des tunnels a été étudié sur un quai de métro à Taïwan. On a mesuré les $\text{PM}_{2,5}$ et les PM_{10} juste avant un lavage des tunnels, puis deux et trois mois après (Chen et coll., 2017). Bien que l'étude ait fait état d'une diminution des taux de $\text{PM}_{2,5}$ et de PM_{10} dans les mois qui ont suivi le lavage du tunnel, aucun test statistique n'a été réalisé. De plus, la saisonnalité des particules dans le métro, mentionnée dans plusieurs études (Lee et coll., 2016; Martins et coll., 2016; Van Ryswyk et coll., 2017), n'a pas été prise en compte dans l'analyse. Comme les données sur les particules avant et

après le lavage ont été recueillies en septembre et en décembre, respectivement, il est probable que la saisonnalité ait joué un rôle dans les différences observées au cours de ces deux périodes. En effet, une étude précédente, qui a recueilli des données en été et en hiver, a montré la variation saisonnière des particules sur dix quais de ce réseau (Chen et coll., 2016). Cependant, les tendances saisonnières n'étaient pas uniformes entre les dix quais et entre les deux tailles de particules ($PM_{2,5}$ et PM_{10}) [Chen et coll., 2017]. Par conséquent, la saisonnalité peut avoir augmenté ou atténué l'effet observé du lavage des tunnels.

Dans le cadre de l'EQAM de Santé Canada, l'utilisation d'un aspirateur sur rails n'a pas entraîné de réduction des concentrations de $PM_{2,5}$ sur les quais (Van Ryswyk et coll., 2021). Cette étude a comparé les concentrations quotidiennes de $PM_{2,5}$ sur les quais avant et après dix opérations d'aspiration. Il s'agissait de la première fois que cette méthode de nettoyage était utilisée dans le réseau de métro de Toronto. L'objectif principal était d'éliminer les débris sur les voies pour prévenir les incendies; toutefois, la méthode n'a pas permis de réduire les taux de $PM_{2,5}$ sur les quais. Cela laisse croire que la poussière ancienne ne représente pas une source importante de particules dans le métro de Toronto. En outre, l'EQAM a inclus la comparaison des $PM_{2,5}$ sur les quais entre deux nouvelles stations (ouvertes en 2017) et six stations plus anciennes (ouvertes entre 1963 et 1978) de la même ligne. En l'espace d'un an de fonctionnement, les deux nouvelles stations avaient atteint les concentrations quotidiennes de $PM_{2,5}$ caractéristiques des anciennes stations (Van Ryswyk et coll., 2021). Une étude du réseau de Stockholm a signalé des résultats similaires dans une station récemment ouverte, qui a atteint des concentrations de $PM_{2,5}$ et de PM_{10} égales à celles d'une station antérieure dans les mois qui ont suivi sa mise en service (Cha et coll., 2019). Selon ces résultats, les $PM_{2,5}$ dans le métro sont attribuables à des émissions récentes plutôt qu'à la remise en suspension des poussières anciennes accumulées.

Résumé

- En général, ces approches peuvent seulement être employées en dehors des périodes de service, lorsque les niveaux de particules sont au plus bas.
- Les études d'intervention qui ont évalué la capacité de l'aspiration et du lavage des tunnels à réduire les concentrations de particules dans le métro ont révélé un effet limité sur la qualité de l'air du réseau.
- Cela peut être lié aux résultats indiquant que les particules du métro sont principalement constituées de poussières émises récemment, par opposition aux poussières anciennes accumulées.

3.5. RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE PARTICULES DANS LES MÉTROS

Comme nous l'avons vu à la section 3.1, d'après plusieurs études, les composants du métro sont une source majeure de particules (Kang et coll., 2008; Minguillón et coll., 2018; Park et coll., 2014b; Huang et coll., 2021). Cette hypothèse est étayée par la distribution granulométrique et la morphologie des particules dans les métros, qui sont caractéristiques des particules émises par des processus de friction mécanique à haute température (Jung et coll., 2012; Moreno et coll., 2015, 2017a; Namgung et coll., 2016; Namgung et coll., 2017). De même, la composition élémentaire de ces particules est

similaire à celle de composants du métro tels que les roues, les rails, les matériaux des garnitures de frein, les composants électriques, les lubrifiants et le ballast. Combinées, ces sources peuvent être à l'origine de la majorité des particules dans un métro. Cependant, peu d'études ont fourni une estimation des contributions individuelles de ces composants aux particules qui se retrouvent dans les métros. Dans le métro de Barcelone, on a estimé que les freins étaient le contributeur le plus important parmi les trois principales sources de particules du métro (freins, roues et rails), qui représentaient ensemble de 43 % à 90 % du total des $PM_{2,5}$ du métro (Minguillion et coll., 2018). Ainsi, une réduction de la poussière liée au freinage pourrait abaisser les émissions de particules provenant du métro.

Plusieurs études sur la réduction des émissions de particules dans les métros ont mis l'accent sur le freinage. Comme la plupart des réseaux de métro utilisent la propulsion électrique, une combinaison de freinage électrique et par friction est utilisée pour ralentir les trains (Gunay et coll., 2020). Le freinage est déclenché par la conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique. L'énergie électrique est ensuite convertie en énergie thermique au moyen d'une résistance (freinage rhéostatique) ou restituée au système (freinage à récupération). Quand le train a ralenti jusqu'à environ 5 km/h, les freins à friction sont appliqués, ce qui entraîne l'arrêt du train (Günay et coll., 2020; Moreno et coll., 2015; Van Ryswyk et coll., 2021). En situation d'urgence, les freins à friction sont appliqués à des vitesses plus élevées. Un taux élevé d'utilisation des freins d'urgence peut augmenter considérablement les concentrations de particules dans un réseau. On estime qu'en 2017-2018, les concentrations de $PM_{2,5}$ sur les quais de la ligne 2 du métro de Toronto ont augmenté de 50 % par rapport aux mesures prises en 2010-2011 (Van Ryswyk et coll., 2021). Cette augmentation a été attribuée à un taux élevé de freinage d'urgence (par friction) (TTC, 2019; Wong, 2019). Après la résolution du problème et la reprise de l'utilisation régulière du freinage par friction, les concentrations de $PM_{2,5}$ sont redescendues en dessous des niveaux de 2011. Dans cet exemple, le taux d'émission de particules a augmenté (puis diminué) pour un certain nombre de composants du métro, notamment les roues, les rails, les lubrifiants et les freins. Ces résultats démontrent que l'utilisation du freinage par friction peut avoir une incidence considérable sur les concentrations de $PM_{2,5}$ dans les métros.

Les caractéristiques des particules qui se retrouvent dans l'air en raison de l'usure des freins ont été étudiées dans un laboratoire contrôlé au moyen d'un dynamomètre (Wahlstrom et coll., 2010). Des plaquettes organiques à faible teneur en métal et sans amiante ont été testées avec des rotors en fonte grise, et les particules émises ont été caractérisées. La plupart des particules générées se situaient dans la gamme de taille des $PM_{2,5}$, avec une distribution bimodale, et étaient composées de fer, de zinc, de baryum et de cuivre. Une autre étude a identifié des particules ferromagnétiques de taille nanométrique, qui pourraient découler d'une usure mécanique à haute température entre les surfaces de freinage (Moreno et coll., 2015). D'après la morphologie et l'état d'oxydation des particules observées par microscopie électronique à balayage et par microscopie électronique à transmission, ces particules ont une structure en flocons et une forte teneur en matériaux de carbone et de fer oxydé provenant des composants du système de freinage (Moreno et coll., 2015, 2017a; Namgung et coll., 2016; Namgung et coll., 2017).

Dans une étude en laboratoire conçue pour étudier les émissions des freins de métro, la libération de nanoparticules a été quantifiée à partir des disques et des plaquettes de frein dans diverses conditions de freinage (Namgung et coll., 2016). L'étude a démontré la relation entre la température des freins et la production de particules et a relevé une augmentation exponentielle lorsque la

température des freins dépassait 70 °C. Ces résultats portent à croire que des protocoles de freinage visant une application plus lente et plus régulière des freins pourraient maintenir des températures de frein plus basses et ainsi réduire la formation de poussières de freinage dans le métro.

Dans l'ensemble, les publications sur la réduction des émissions de particules provenant du fonctionnement du métro et de ses composants sont limitées. Il faudra effectuer davantage de recherches pour déterminer comment les protocoles de freinage et la nature des composants du métro (freins, rails, roues, lubrifiants et composants électriques) peuvent influencer la qualité de l'air dans le métro. Selon les recherches menées à ce jour, les émissions liées à l'exploitation du métro sont une source majeure de particules, et les efforts visant à réduire la production de ces émissions peuvent améliorer la qualité de l'air d'un métro. Cela peut se faire par une utilisation moindre ou plus douce du freinage par friction et par l'utilisation de matériaux de garniture de frein plus durables. D'après les études sur les véhicules routiers, des protocoles et des technologies peuvent réduire la fréquence, la durée et l'intensité des freinages. Leur application peut entraîner une diminution des niveaux de particules dans les réseaux de métro, bien que cela n'ait pas encore été évalué dans ces réseaux. Ces travaux ont permis d'examiner l'incidence des matériaux des sabots et des disques de frein sur la production de particules, tout en évaluant d'autres facteurs tels que la capacité, le bruit, la longévité, la production de chaleur et les dépenses dans diverses conditions de freinage standard (Grigoratos et Martini, 2015; Blau, 2003).

Enfin, un examen des taux d'usure et de remplacement des consommables d'un réseau de métro (roues, rails, matériaux de garniture de frein, lubrifiants et composants électriques) permettrait d'évaluer leur contribution relative aux particules produites par le métro. Avec des estimations précises de leur durée de vie, de leur nombre et de leur perte de masse au cours de leur utilisation, leurs taux d'émission de particules pourraient être estimés et comparés. Cela permettrait aux sociétés de transport de déterminer quels composants contribuent le plus aux particules du métro et de réduire en priorité les émissions connexes. La surveillance des particules en suspension (abordée dans la section suivante) pourrait être effectuée conjointement à ces efforts, afin d'évaluer les stratégies de réduction des émissions. Cette stratégie est recommandée pour les réseaux canadiens qui cherchent à réduire les émissions de particules attribuables au fonctionnement du réseau.

Résumé

- Les émissions provenant de l'usure des composants du métro (roues, rails, matériaux des garnitures de frein, composants électriques, lubrifiants et ballast) contribuent pour 30 à 91 % des particules du métro, selon les estimations.
- Peu d'études ont pu déterminer les contributions relatives de ces composants à la quantité totale de particules émises par le réseau.
- La réalisation d'un audit du nombre, de la durée de vie et de la perte de masse de ces composants au cours de leur utilisation pourrait fournir des estimations des taux relatifs d'émission de particules de ces composants. Les stratégies visant à réduire les émissions de particules du métro pourraient alors porter en priorité sur ces composants.
- L'utilisation de freins à friction pour l'arrêt complet des trains, ainsi que dans les situations d'urgence et de freinage brusque, peut être à l'origine d'une part importante des particules du métro, notamment dans la plage des particules fines.

- La quantité de particules générées par les systèmes de freinage par friction dépend du matériau et de la force du frein. Lorsque les composants des freins dépassent un seuil thermique (estimé dans une étude à 70 °C), la production de particules augmente de manière exponentielle.
- Les études sur les véhicules routiers montrent que les protocoles et les technologies qui réduisent la fréquence, la durée et l'intensité des freinages peuvent réduire les émissions de particules. Leur application pourrait entraîner une diminution des niveaux de particules dans les réseaux de métro, bien que cela n'ait pas encore été évalué dans ces réseaux.

3.6. SURVEILLANCE DE LA QUALITÉ DE L'AIR

Les systèmes de surveillance de la qualité de l'air du métro ont fait l'objet d'études approfondies en République de Corée. Ces études visaient à évaluer la conformité à la réglementation sur la qualité de l'air après l'adoption de stratégies d'atténuation et à maximiser l'efficacité énergétique du SVM. Des systèmes de surveillance ont été mis au point pour évaluer le temps, la durée et la puissance nécessaires pour réduire les concentrations élevées de polluants, et ce, à un coût minimal. Proposé et testé pour la première fois en 2007, un système de surveillance a mesuré plusieurs polluants de l'air et paramètres environnementaux à l'intérieur et à l'extérieur du SVM (Kim et coll., 2010). Ce système de surveillance utilisait initialement des méthodes statistiques pour optimiser le fonctionnement de la ventilation (Kim et coll., 2010; Lim et coll., 2012). Pendant une décennie, l'approche a été affinée grâce à l'apprentissage automatique (Liu et Yoo, 2016; Park et coll., 2018; Liu et coll., 2020; Tariq et coll., 2021) et à l'informatique en nuage (Jo et coll., 2012). Parallèlement aux améliorations du modèle, des études ont été menées pour améliorer les capteurs de la pollution de l'air et minimiser les erreurs de données (Liu et coll., 2012; Kim, G.S., et coll., 2016; Kim, M.J., et coll., 2016).

Kim et coll. (2010) ont mis à l'essai le premier système de surveillance de la qualité de l'air du métro qui contrôlait le fonctionnement du SVM. Les polluants (NO , NO_2 , NO_x , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, CO , CO_2), la température et l'humidité ont été mesurés en temps réel à l'intérieur et à l'extérieur de quatre stations de métro. Des modèles ont été élaborés à partir de ces conditions extérieures et intérieures, ainsi que des renseignements sur la fréquentation, afin de prédire les moments où des concentrations élevées de PM_{10} et de $\text{PM}_{2.5}$ se produisent dans le métro. Les auteurs ont constaté que les modèles propres aux stations avec saisonnalité ont donné de meilleurs résultats qu'un modèle annuel pour l'ensemble des stations. Lim et coll. (2012) ont utilisé des données intérieures et extérieures provenant d'une seule station de métro pour démontrer l'efficacité d'une méthode de modélisation statistique moins exigeante en matière de calcul.

Kim et coll. (2016) ont mis en place une surveillance des PM_{10} , du CO_2 , de la température et des conditions d'humidité dans les aires d'attente, les quais, les tunnels et les sites extérieurs des stations de métro. Ils ont montré que la qualité de l'air dans le métro pouvait être améliorée si les systèmes de ventilation étaient coupés lorsque la qualité de l'air extérieur était mauvaise. Park et coll. (2018) ont mesuré les PM_{10} à l'intérieur et à l'extérieur de six grandes stations de correspondance du RMS. En plus des taux de ventilation et de la fréquence des trains dans ces stations, ces auteurs ont mis au point un modèle de réseau neuronal artificiel qui a surpassé une méthode de modélisation statistique pour la prédiction des taux de PM_{10} .

Les équipements de surveillance et les données sont soumis à des vérifications de contrôle de la qualité/assurance de la qualité en temps réel. Liu et coll. (2012) ont élaboré des algorithmes pour déterminer et corriger les défauts courants des équipements de mesure des polluants afin d'améliorer la fiabilité du système de surveillance. Liu et Yoo (2016) ont proposé une méthode de modélisation par apprentissage automatique pour améliorer la détection des mesures aberrantes. Liu et coll. (2020) ont encore amélioré les corrections des erreurs de mesure en utilisant des techniques statistiques perfectionnées. Dans l'ensemble, ces études montrent que l'entretien des équipements de surveillance, ainsi que le contrôle de la qualité et l'assurance de la qualité des données sont fondamentaux pour préserver la confiance non seulement envers le système de surveillance, mais aussi les améliorations de la qualité de l'air intérieur et l'efficacité du SVM.

Comme mentionné dans la section sur la ventilation (section 4.1), la surveillance en temps réel des niveaux de particules dans le métro est une mesure de rétroaction nécessaire afin d'optimiser le fonctionnement du système de ventilation mécanique. Les systèmes peuvent être conçus pour s'activer ou se désactiver en fonction du besoin de confort climatique dans le métro, des niveaux de particules à l'extérieur et d'une valeur seuil désignée pour les particules dans le métro.

L'EQAM de Santé Canada aborde également les avantages d'une surveillance régulière de la qualité de l'air dans le métro (Van Ryswyk et coll., 2021). Une surveillance à long terme (couvrant neuf mois) des particules était nécessaire pour évaluer l'incidence des paramètres d'exploitation du système (c.-à-d. l'aspiration sur rails, la modernisation des trains et les changements relatifs au freinage) sur les niveaux de $PM_{2,5}$ dans le métro. Le guide technique sur la qualité de l'air dans le métro publié par le projet Improve Life décrit une méthodologie d'audit concernant la qualité de l'air dans le métro (Moreno et coll., 2017c). L'audit doit mener à la mise en œuvre un programme d'amélioration de la qualité de l'air dans le métro. Selon le guide, l'audit commence par l'établissement d'une liste des stations du réseau et la classification de chaque station en fonction d'une série de facteurs qui ont une incidence connue sur la qualité de l'air dans le métro. Cela comprend notamment de l'information sur les systèmes de ventilation existants des stations (mécanique ou effet piston), la présence et la position des puits de ventilation, la profondeur et le volume des gares, la conception des quais (voie simple ou double, quais centraux ou latéraux, présence et étendue des portes palières) et les caractéristiques des systèmes de ventilation des trains. En outre, l'audit doit inclure des renseignements sur le nombre de courbes et les pentes de chaque ligne, ainsi que sur les facteurs de conception des trains (systèmes de filtration dans le train, type et composition des sabots ou disques de frein). Enfin, le guide propose l'utilisation de méthodes de surveillance des particules conformes aux normes officielles, afin de faciliter la comparaison des données de surveillance avec les lignes directrices publiées. L'utilisation de capteurs à faible coût pour caractériser les concentrations de particules dans un métro est également abordée. Cette approche peut convenir. Toutefois, de telles méthodes doivent être systématiquement comparées à une méthode de référence à des fins d'étalonnage.

Résumé

- Le RMS procède à la surveillance et à la modélisation de la qualité de l'air dans le métro selon une approche sophistiquée, qui oriente l'utilisation de la ventilation mécanique pour maintenir les normes de qualité de l'air.
- La surveillance de la qualité de l'air du métro à long terme (la majorité d'une année) a servi à évaluer l'effet de l'exploitation du réseau sur la qualité de l'air dans le métro.
- La surveillance de la qualité de l'air fournit des renseignements sur la variation spatiale et temporelle des concentrations de particules. Ces renseignements sont essentiels à la mise en place de stratégies visant à améliorer la qualité de l'air dans le métro.
- Bien que les méthodes non standard de mesure des particules dans le métro permettent de suivre l'évolution des concentrations, l'utilisation de ces données pour des comparaisons avec toute norme existante nécessiterait un étalonnage systématique.

CHAPITRE 4:

CONCLUSIONS

La littérature scientifique a indiqué qu'il pourrait y avoir des concentrations élevées de polluants de l'air dans certaines parties des métros au Canada et à l'international, ce qui a nécessité l'évaluation des mesures d'atténuation. Le principal polluant de l'air dans les métros, les $PM_{2,5}$, a un large éventail d'effets sur la santé, notamment l'asthme, le cancer du poumon, les maladies coronariennes, les crises cardiaques, les accidents vasculaires cérébraux et la réduction de l'espérance de vie. Le présent document donne une vue d'ensemble de la qualité de l'air dans les métros et relève plusieurs stratégies en vue de son amélioration dans les réseaux. Six domaines clés ont été identifiés dans la littérature scientifique pour améliorer la qualité de l'air dans les métros : la ventilation, la filtration, la surveillance de la qualité de l'air, la réduction des émissions de particules dans le métro, l'aspiration et le lavage, et les portes palières. Dans l'ensemble, l'examen réalisé a révélé ce qui suit :

Les stratégies suivantes peuvent contribuer à l'amélioration de la qualité de l'air dans les métros :

- Contrôler régulièrement la qualité de l'air dans le métro. Cela permet aux gestionnaires des réseaux de métros de comprendre où se trouvent les fortes concentrations de particules et à quel moment elles se produisent, de détecter les variations des concentrations de particules dans le métro et d'élaborer des stratégies pour y améliorer la qualité de l'air;
- Recourir à des systèmes de ventilation mécanique au lieu de compter uniquement sur la ventilation par l'effet piston ou la ventilation naturelle;
- Automatiser et optimiser le fonctionnement du système de ventilation mécanique en fonction de l'horaire des trains et des concentrations de particules mesurées sur les quais et à l'extérieur;
- La filtration à l'intérieur des trains pourrait s'avérer plus efficace pour réduire l'exposition des navetteurs que la filtration sur les quais, étant donné que la réduction des particules à l'échelle d'une station nécessiterait un nombre important d'unités, et que les navetteurs passent la majorité de leur temps à l'intérieur des trains;
- Utiliser des méthodes d'élimination des particules par magnétisme. Cette approche est idéale pour les particules riches en fer que l'on trouve couramment dans les métros;
- Réduire l'utilisation des freins à friction et choisir des matériaux de frein plus durables pour contribuer à réduire la production de particules dans le réseau;
- Réaliser un audit des taux d'usure et de remplacement des composants du métro (tels que les roues, les rails, les matériaux des garnitures de frein, les composants électriques, les lubrifiants et le ballast), ce qui permettra de déterminer d'où proviennent principalement les particules produites dans le métro.

Les coûts liés aux différentes stratégies d'amélioration de la qualité de l'air ne sont pas abordés. Il est reconnu qu'une stratégie peut améliorer efficacement la qualité de l'air dans le métro, tout en ayant un coût d'application prohibitif. Il est aussi reconnu que les mesures examinées dans l'analyse n'auront pas forcément la même efficacité dans l'ensemble des stations, des lignes ou des réseaux de métro.

RÉFÉRENCES

- Aarnio, P., Yli-Tuomi, T., Kousa, A., Mäkelä, T., Hirsikko, A., Hämeri, K., Räisänen, M., Hillamo, R., Koskentalo, T. et Jantunen, M., 2005. The concentrations and composition of and exposure to fine particles (PM_{2.5}) in the Helsinki subway system. *Atmos.* 39(28): 5059–5066.
- Abdurrahman, U.T., Jack, A. et Schmid, F., 2018. Effects of platform screen doors on the overall railway system. 8th International Conference on Railway Engineering (ICRE 2018). <https://doi.org/doi:10.1049/cp.2018.0053>
- Adar, S.D., Filigrana, P.A., Clements, N., Peel, J.L. Ambient coarse particulate matter and human health: a systematic review and meta-analysis. *Curr. Environ. Heal. Reports*, 1 (2014), pp. 258-274.
- American Public Transportation Association (APTA), 2019. Transit Ridership Report Fourth Quarter and End-of-Year 2018. <https://www.apta.com/research-technical-resources/transit-statistics/ridership-report/ridership-report-archives/>.
- Association internationale des tunnels et de l'espace souterrain, 2004. Underground or Aboveground? Making the Choice for Urban Mass Transit: A Report by the International Tunnelling Association (ITA). Prepared by Working Group Number 13 (WG13). 'Direct and Indirect Advantages of underground Structures'.
- Bachoual, R., Boczkowski, J., Goven, D., Amara, N., Tabet, L., On, D., Leçon-Malas, V., Aubier, M. et Lanone, S., 2007. Biological effects of particles from the Paris subway system. *ChemToxicol.* 20(10): 1426–1433.
- Blau, P., 2003. Microstructure and Detachment Mechanism of Friction Layers on the Surface of Brake Shoes. *Journal of Materials Engineering and Performance* 12, 56–60. <https://doi.org/doi:10.1361/105994903770343484>
- Braniš, M., 2006. The contribution of ambient sources to particulate pollution in spaces and trains of the Prague underground transport system. *Atmos. Environ.* 40(2): 348–356.
- Brüne, M., Pflitsch, A., Agnew, B. et Spiegel, J. 2012. Dynamics of natural air flow inside subway tunnels. In: A. Lönnermark and H. Ingason (Eds.), *Proceedings from the Fifth International Symposium on Tunnel Safety and Security*, volume 1, 329–337, Borås, Sweden. SP Technical Research Institute of Sweden.
- Casals, M., Gangoellis, M., Forcada, N., Macarulla, M. et Giretti, A. 2014. A breakdown of energy consumption in an underground station. *Energy Build.* 78: 89–97. <https://doi.org/doi:10.1016/j.enbuild.2014.04.020>
- Cha Y., Tu M., Elmgren M., Silvergren S., Olofsson U. Variation in airborne particulate levels at a newly opened underground railway station. *Aerosol and Air Quality Research*. 2019. 19(4), 737 - 748.
- Cha, Y.; Olofsson, U.; Gustafsson, M.; Johansson, C. On particulate emissions from moving trains in a tunnel environment. *Transport. Res. Part D Transport Environ.*, 59 (2018), pp. 35-45
- Chen, Y. Y., Lu, C., Chen, P., Mao, I. et Chen, M., 2017. Analysis of Aerosol Composition and Assessment of Tunnel Washing Performance within a Mass Rapid Transit System in Taiwan. *Aerosol Air Qual. Res.* 17(6): 1527–1538.
- Chen, Y. Y., Sung, F. C., Chen, M. L., Mao, I. F et Lu, C. Y., 2016. Indoor air quality in the metro system in north Taiwan. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 13(12): 1200. <https://doi.org/doi:10.3390/ijerph13121200>
- Chillrud, S., Epstein, D., Ross, J., Sax, S., Pederson, D., Spengler, J. et Kinney, P., 2004. Elevated Airborne Exposures of Teenagers to Manganese, Chromium, and Iron from Steel Dust and New York City's Subway System. *Environ. Sci. Tech.* 38(3): 732–737.
- Choi, S. I., Feng, J., Kim, S. B. et Jo, Y. M., 2018. Magnetization of metal mesh for fine dust capture. *Aerosol Air. Qual. Res.* 18(7): 1932–1943. <https://doi.org/doi:10.4209/aaqr.2017.11.0491>

Committee on the Medical Effects of Air Pollutants (COMEAP). Particulate Air Pollution on London Underground: Health Effects, Jan 9, 2019. <https://www.gov.uk/government/publications/particulate-air-pollution-on-london-underground-health-effects>.

Cui, G., Zhou, L. et Dearing, J., 2016. Granulometric and magnetic properties of deposited particles in the Beijing subway and the implications for air quality management. *Sci. Total Environ.* 568: 1059–1068.

Cusack, M., Talbot, N., Ondráček, J., Minguillón, M., Martins, V., Klouda, K., Schwarz, J. et Ždímal, V., 2015. Variability of aerosols and chemical composition of PM10, PM2.5 and PM1 on a platform of the Prague underground metro. *Atmos. Environ.* 118: 176–183.

Environmental Protection Agency des États-Unis (US EPA), 2009. Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter (final report, December 2009). Washington, DC, EPA/600/R-19/188, 2019. <https://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deid=216546>

Eom, H., Jung, H., Sobanska, S., Chung, S., Son, Y., Kim, J., Sunwoo, Y. et Ro, C., 2013. Iron Speciation of Airborne Subway Particles by the Combined Use of Energy Dispersive Electron Probe X-ray Microanalysis and Raman Microspectrometry. *Anal. Chem.* 85(21): 10424–10431.

Figueroa-Lara, J., Murcia-González, J., García-Martínez, R., Romero-Romo, M., Torres Rodríguez, M. et Mugica-Álvarez, V., 2019. Effect of platform subway depth on the presence of Airborne PM2.5, metals, and toxic organic species. *J. Hazard. Mater.* 377: 427–436. <https://doi.org/doi:10.1016/j.jhazmat.2019.05.091>

Grigoratos, T. et Martini, G., 2015. Brake wear particle emissions: a review. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 22(4): 2491–2504. doi:10.1007/s11356-014-3696-8

Günay, M., Korkmaz, M.E. et Ozmen, R., 2020. An investigation on braking systems used in railway vehicles. *Eng. Science Tech.* 23(2): 421–431. <https://doi.org/doi:10.1016/j.jestch.2020.01.009>

Heo, S. K., Nam, K. J., Loy-Benitez, J., Li, Q., Lee, S. C. et Yoo, C. K., 2019. A deep reinforcement learning-based autonomous ventilation control system for smart indoor air quality management in a subway station. *Energy Build.* 202. <https://doi.org/doi:10.1016/j.enbuild.2019.109440>

Huang, S., Chen, P., Hu, K., Qiu, Y., Feng, W., Ren, Z., Wang, X., Huang, T. et Wu, D. Characteristics and Source Identification of Fine Particles in the Nanchang Subway, China. *Build. Environ.* 199 (2021): 107925. <https://doi.org/doi:10.1016/j.buildenv.2021.107925>

James, P., Ito, K., Buonocore, J. J., Levy, J. I. et Arcaya, M. C., 2014. A health impact assessment of proposed public transportation service cuts and fare increases in Boston, Massachusetts (U.S.A.). *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 11(8), 8010–8024. <https://doi.org/doi:10.3390/ijerph110808010>

Jeon, J. S., Seo, J. W., Jeon, M. J., Eom, S. W. et Chae, Y. Z., 2012. Indoor Radon levels in the subway cabins of the Seoul metropolitan area. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.* 28 (4): 374–383 [en coréen].

Jo, Y., Kim, W. et Park, H., 2012. Alternative filtration for management of indoor air quality in Seoul metro subway. The 2012 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM).

Johansson, C. et Johansson, P. Å., 2003. Particulate matter in the underground of Stockholm. *Atmos. Environ.* 37(1): 3–9. [https://doi.org/doi:10.1016/S1352-2310\(02\)00833-6](https://doi.org/doi:10.1016/S1352-2310(02)00833-6)

Jung, H. J., Kim, B. W., Malek, M. A., Koo, Y. S., Jung, J. H., Son, Y. S., Kim, J. C., Kim, H. K. et Ro, C. U., 2012. Chemical speciation of size-segregated floor dusts and airborne magnetic particles collected at underground subway stations in Seoul, Korea. *J. Hazard. Mater.* 213–214: 331–340. <https://doi.org/doi:10.1016/j.jhazmat.2012.02.006>

- Jung, H. J., Kim, B. W., Ryu, J. Y., Maskey, S., Kim, J. C., Sohn, J. et Ro, C. U., 2010. Source identification of particulate matter collected at underground subway stations in Seoul, Korea using quantitative single-particle analysis. *Atmos. Environ.* 44(19): 2287–2293. <https://doi.org/doi:10.1016/j.atmosenv.2010.04.003>
- Kang, S., Hwang, H., Park, Y., Kim, H. et Ro, C. U., 2008. Chemical compositions of subway particles in Seoul, Korea determined by a quantitative single particle analysis. *Environ. Sci. Tech.* 42(24): 9051–9057. <https://doi.org/doi:10.1021/es802267b>
- Kelly, F. J. et Fussell, J. C., 2015. Air pollution and public health: emerging hazards and improved understanding of risk. *Environ. Geochem. and Health.* 37(4): 631–649. <https://doi.org/doi:10.1007/s10653-015-9720-1>
- Kim, G. S., Son, Y. S., Lee, J. H., Kim, I. W., Kim, J. C., Oh, J. T. et Kim, H., 2016. Air Pollution Monitoring and Control System for Subway Stations Using Environmental Sensors. *J. Sensors.* <https://doi.org/doi:10.1155/2016/1865614>
- Kim, J. B., Kim, S., Lee, G. J., Bae, G. N., Cho, Y., Park, D., Lee, D. H et Kwon, S. B. 2014. Status of PM in Seoul metropolitan subway cabins and effectiveness of subway cabin air purifier (SCAP). *Clean Technol. Environ. Policy.* 16(6): 1193–1200.
- Kim, K. H., Ho, X. D., Jeon, J. S. et Kim, J. C., 2012. A noticeable shift in particulate matter levels after platform screen door installation in a Korean subway station. *Atmos. Environ.*, 49: 219–223.
- Kim, M. J., Braatz, R. D., Kim, J. T. et Yoo, C. K., 2016. Economical control of indoor air quality in underground metro station using an iterative dynamic programming-based ventilation system. *Indoor Built Environ.*, 25 (6): 949–961.
- Kim, M. K., Jang, Y. et Park, D., 2020. Determination of the optimum removal efficiency of fine particulate matter using activated carbon fiber (Acf). *Int. J. Env. Res. Public Health.* 17(20): 1–10.
- Kim, M., Braatz, R. D., Kim, J. T. et Yoo, C., 2015. Indoor air quality control for improving passenger health in subway platforms using an outdoor air quality dependent ventilation system. *Build. Environ.* 92(C) 407–417. <https://doi.org/doi:10.1016/j.buildenv.2015.05.010>
- Kim, Y. S., Kim, J. T., Kim, I. W., Kim, J. C. et Yoo, C., 2010. Multivariate monitoring and local interpretation of indoor air quality in Seoul's metro system. *Environ. Eng. Sci.* 27(9): 721–731. <https://doi.org/doi:10.1089/ees.2009.0261>
- Korean Ministry of the Environment (KMOE). Korean Indoor Air Quality Control Act, Amendment No. 15583 (2005)
- Korean Ministry of the Environment (KMOE). Strict management of indoor air quality in public transportation such as subways. Press/Explanation. Publié le 2 avril 2020. [Consultation le 4 septembre 2021]. <http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?menuId=286&boardMasterId=1&boardCategoryId=39&boardId=1362840>
- Lee, E. S., Lee, T. J., Park, M. B., Park, D., Kim, S. D. et Kim, D. S., 2016. The size-oriented particulate mass ratios and their characteristics on the Seoul metropolitan subway lines. *Asian J. Atmos. Environ.* 10(4): 217–225.
- Lee, K. R., Kim, W. G., Woo, S. H., Kim, J. B., Bae, G. N., Park, H. K., Yoon, H. et Yook, S. J., 2016. Investigation of airflow and particle behavior around a subway train running in the underground tunnel. *Aerosol Sci. Tech.* 50(7): 669–678.
- Lee, S., Kim, M. J., Pyo, S. H., Kim, J. T. et Yoo, C. K., 2015. Evaluation of an optimal ventilation IAQ control strategy using control performance assessment and energy demand. *Energy Build.* 98: 134–143. <https://doi.org/doi:10.1016/j.enbuild.2014.08.040>
- Lee, Y., Lee, Y. C., Kim, T., Choi, J. S. et Park, D., 2018. Sources and Characteristics of Particulate Matter in Subway Tunnels in Seoul, Korea. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 15 (11): 2534.

- Li, K. and Jo, Y. M., 2010. Dust collection by a fiber bundle electret filter in an MVAC system. *Aerosol Sci. Technol.* 44(7): 578–587.
- Li, S., Liu, Y., Purevjav, A. O. et Yang, L., 2019. Does Subway Expansion Improve Air Quality? *J. Env. Econ. Manag.* 96: 213–235. <https://doi.org/doi:10.1016/j.jeem.2019.05.005>
- Lim, J. J., Kim, Y. S., Oh, T. S., Kim, M. J., Kang, O. Y., Kim, J. T., Kim, I. W., Kim, J. C., Jeon, J. S. et Yoo, C. K., 2012. Analysis and prediction of indoor air pollutants in a subway station using a new key variable selection method. *Korean J. Chem. Eng.*, 29(8): 994-1003.
- Liu, H. et Yoo, C., 2016. A robust localized soft sensor for particulate matter modeling in Seoul metro systems. *J. Hazard. Mater.* 305: 209–218.
- Liu, H., Kim, M., Kang, O., Sankararao, B., Kim, J., Kim, J. C. et Yoo, C. K., 2012. Sensor validation for monitoring indoor air quality in a subway station. *Indoor Built Environ.* 21(1): 205–211.
- Liu, H., Lee, S., Kim, M., Shi, H., Kim, J. T., Wasewar, K. L. et Yoo, C., 2013. Multi-objective optimization of indoor air quality control and energy consumption minimization in a subway ventilation system. *Energy Build.*, 66: 553–561.
- Liu, H., Yang, C., Huang, M. et Yoo, C. K., 2020. Multivariate statistical monitoring of subway indoor air quality using dynamic concurrent partial least squares. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 27(4): 4159–4169.
- Lovett, C., Shrmohammadi, F., Sowlat, M., Sioutas, C., 2017. Commuting in Los Angeles: Cancer and Non-Cancer Health Risks of Roadway Light-Rail and Subway Transit Routes. *Aerosol and Air Quality Research*. ISSN:1680-8584.
- Loxham, M. et Nieuwenhuijsen, M. J., 2019. Health effects of particulate matter air pollution in underground railway systems – A critical review of the evidence. *Part. Fibre Toxicol.* 16(1). <https://doi.org/doi:10.1186/s12989-019-0296-2>
- Loxham, M., Cooper, M. J., Gerlofs-Nijland, M. E., Cassee, F. R., Davies, D. E., Palmer, M. R. et Teagle, D. A. H., 2013. Physicochemical characterization of airborne particulate matter at a mainline underground railway station. *Environ. Sci. Tech.* 47(8): 3614–3622. <https://doi.org/doi:10.1021/es304481m>
- Loy-Benitez, J., Heo, S. K. et Yoo, C. K., 2020. Imputing missing indoor air quality data via variational convolutional autoencoders: Implications for ventilation management of subway metro systems. *Build. Environ.* 182. <https://doi.org/doi:10.1016/j.buildenv.2020.107135>
- Loy-Benitez, J., Li, Q., Ifaei, P., Nam, K., Heo, S., Yoo, C., 2018. A dynamic gain-scheduled ventilation control system for a subway station based on outdoor air quality conditions. *Building and Environment* 144, 159–170. <https://doi.org/doi:10.1016/j.buildenv.2018.08.016>
- Loy-Benitez, J., Li, Q., Nam, K., Nguyen, H.T., Kim, M., Park, D., Yoo, C., 2021. Multi-objective optimization of a time-delay compensated ventilation control system in a subway facility – A harmony search strategy. *Building and Environment* 190. <https://doi.org/doi:10.1016/j.buildenv.2020.107543>
- Luglio, D. G., Katsigeorgis, M., Hess, J., Kim, R., Adragna, J., Raja, A., Gordon, C., Fine, F., Thurston, G., Gordon, T. et Vilcassim, M. J. R., 2021. PM_{2.5} Concentration and Composition in Subway Systems in the Northeastern United States. *Environ. Health Perspect.* 129(2): 027001. <https://doi.org/doi:10.1289/ehp7202>
- Martins, V., Moreno, T., Mendes, L., Eleftheriadis, K., Diapouli, E., Alves, C. A., Duarte, M., de Miguel, E., Capdevila, M., Querol, X. et Minguillón, M. C., 2016. Factors controlling air quality in different European subway systems. *Environ. Res.* 146: 35–46. <https://doi.org/doi:10.1016/j.envres.2015.12.007>
- Martins, V., Moreno, T., Minguillón, M. C., Amato, F., de Miguel, E., Capdevila, M. et Querol, X., 2015. Exposure to airborne particulate matter in the subway system. *Sci. Total Environ.* 511: 711–722. <https://doi.org/doi:10.1016/j.scitotenv.2014.12.013>

- Matz, C., Stieb, D., Davis, K., Egyed, M., Rose, A., Chou, B. et Brion, O., 2014. Effects of age, season, gender and urban-rural status on time-activity: Canadian Human Activity Pattern Survey 2 (CHAPS 2). *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 11(2): 2108–2124.
- Minguillón, M. C., Reche, C., Martins, V., Amato, F., de Miguel, E., Capdevila, M., Centelles, S., Querol, X. et Moreno, T., 2018. Aerosol sources in subway environments. *Environ. Res.* 167: 314–328. <https://doi.org/doi:10.1016/j.envres.2018.07.034>
- Moreno, T. et de Miguel, E., 2018. Improving air quality in subway systems: An overview. *Environ Pollut.* 239: 829–831. doi:10.1016/j.envpol.2018.01.077
- Moreno, T., Martins, V., Querol, X., Jones, T., Bérubé, K., Minguillón, M. C., Amato, F., Capdevila, M., de Miguel, E., Centelles, S. et Gibbons, W., 2015. A new look at inhalable metalliferous airborne particles on rail subway platforms. *Sci. Total Environ.* 505: 367–375. <https://doi.org/doi:10.1016/j.scitotenv.2014.10.013>
- Moreno, T., Pérez, N., Reche, C., Martins, V., de Miguel, E., Capdevila, M., Centelles, S., Minguillón, M. C., Amato, F., Alastuey, A., Querol, X. et Gibbons, W., 2014. Subway platform air quality: Assessing the influences of tunnel ventilation, train piston effect and station design. *Atmos. Environ.* 92: 461–468. <https://doi.org/doi:10.1016/j.atmosenv.2014.04.043>
- Moreno, T., Querol, X., Martins, V., Minguillón, M. C., Reche, C., Ku, L. H., Eun, H. R., Ahn, K. H., Capdevila, M. et De Miguel, E., 2017a. Formation and alteration of airborne particles in the subway environment. *Environ. Sci. Process. Impacts*. 19(1). <https://doi.org/doi:10.1039/c6em00576d>
- Moreno, T., Reche, C., Minguillón, M. C., Capdevila, M., de Miguel, E. et Querol, X., 2017b. The effect of ventilation protocols on airborne particulate matter in subway systems. *Sci. Total Environ.* 584–585: 1317–1323. <https://doi.org/doi:10.1016/j.scitotenv.2017.02.003>
- Moreno, T., Reche, C., Minguillón, M. C., Querol, X., Martins, V., Amato, F., Pérez, N., Bartolí, R., Cabanas, M., Martínez, S., Vasconcelos, C., de Miguel, E., Capdevila, M., Centelles, S., Pellot, M. (2017c). Improving air quality in the subway environment: Technical Guide. (T. Moreno, Ed.). ISBN: 978-84-697-5167-1, 48 pp. Barcelona, Spain.
- Namgung, H. G., Kim, J. B., Woo, S. H., Park, S., Kim, M., Kim, M. S., Bae, G. N., Park, D. et Kwon, S. B., Generation of nanoparticles from friction between railway brake disks and pads. *Environ. Sci. Tech.* 50(7): 3453–3461. <https://doi.org/doi:10.1021/acs.est.5b06252>
- Namgung, H. G., Kim, J. B., Kim, M. S., Woo, S. H., Bae, G. N., Park, D., Kwon, S. B., 2017. Size distribution analysis of airborne wear particles released by subway brake system. *Wear*. 372–373: 169–176.
- National Fire Protection Association (NFPA), 2020. NFPA 130 Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems. 2020 Edition. <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=130>
- Nieuwenhuijsen, M. J., Gomez-Perales, J. E. et Colville, R. N., 2007. Levels of particulate air pollution, its elemental composition, determinants and health effects in metro systems. *Atmos. Environ.* 41, 7995–8006.
- Pan, S., Fan, L., Liu, J., Xie, J., Sun, Y., Cui, N., Zhang, L. et Zheng, B., 2013. A Review of the Piston Effect in Subway Stations. *Adv. Mech. Eng.* 5. <https://doi.org/doi:10.1155/2013/950205>
- Pang, L., Yang, C., Cao, X., Tian, Q. et Li, B., 2020. Experimental Investigation of Air Quality in a Subway Station with Fully Enclosed Platform Screen Doors. *Int. J. Env. Res. Public Health*. 17(14). <https://doi.org/doi:10.3390/ijerph17145213>
- Park, D., Lee, T., Hwang, D., Jung, W., Lee, Y., Cho, K., Kim, D. et Lee, K., 2014a. Identification of the sources of PM10 in a subway tunnel using positive matrix factorization. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 64(12): 1361–1368. <https://doi.org/doi:10.1080/10962247.2014.950766>

- Park, J. H., Son, Y. S. et Kim, K. H., 2019. A review of traditional and advanced technologies for the removal of particulate matter in subway systems. *Indoor Air*. 29(2): 177–191. <https://doi.org/doi:10.1111/ina.12532>
- Park, J. H., Woo, H. Y. et Park, J., C., 2014b. Major factors affecting the aerosol particulate concentration in the underground stations. *Indoor Built Environ*. 23(5): 629–639. <https://doi.org/doi:10.1177/1420326X12466875>
- Park, S., Kim, M., Kim, M., Namgung, H. G., Kim, K. T., Cho, K. H. et Kwon, S. B., 2018. Predicting PM10 concentration in Seoul metropolitan subway stations using artificial neural network (ANN). *J. Hazard. Mater.*, 341: 75–82. <https://doi.org/doi:10.1016/j.jhazmat.2017.07.050>
- Quan, J., Kim, S. H. et Kim, J. H., 2018. A study on probabilistic social cost–benefit analysis to introduce high-efficiency motors into subway station ventilation. *Energy Policy*. 121C: 92–100.
- Querol, X., Moreno, T., Karanasiou, A., Reche, C., Alastuey, A., Viana, M., Font, O., Gil, J., De Miguel, E. et Capdevila, M., 2012. Variability of levels and composition of PM10 and PM2.5 in the Barcelona metro system. *Atmos. Chem. Phys.* 12(11): 5055–5076. <https://doi.org/doi:10.5194/acp-12-5055-2012>
- Reche, C., Moreno, T., Martins, V., Minguillón, M. C., Jones, T., de Miguel, E., Capdevila, M., Centelles, S. et Querol, X., 2017. Factors controlling particle number concentration and size at metro stations. *Atmos. Environ.* 156, 169–181. <https://doi.org/doi:10.1016/j.atmosenv.2017.03.002>
- Ren, J., He, J., Kong, X., Xu, W., Kang, Y., Yu, Z., Li, H. A field study of CO2 and particulate matter characteristics during the transition season in the subway system in Tianjin, China. 2022. *Energy and Buildings* 254, 111620.
- Santé Canada, 2012. Document de conseils sur les particules fines (PM2,5) dans l'air intérieur résidentiel. Government of Canada. <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/publications/vie-saine/document-conseils-particules-fines-pm2-5-air-interieur-residentiel.html>
- Santé Canada. 2013. Évaluation scientifique Canadienne du smog, Volume 2 : effets sur la santé. Ottawa, ON, Canada, Santé Canada. https://publications.gc.ca/collections/collection_2014/sc-hc/En88-5-2-2013-fra.pdf
- Saunders, B. M., Smith, J. D., Smith T. E. L., Green, D. C. et Barratt, B., 2019. Spatial variability of fine particulate matter pollution (PM2.5) on the London Underground network. *Urban Clim.* 30 (1–3). <https://doi.org/doi:10.1016/j.uclim.2019.100535>
- Seaton, A., Cherrie, J., Dennekamp, M., Donaldson, K., Hurley, J. F. et Tran, C. L., 2005. The London Underground: Dust and hazards to health. *Occup. Environ. Med.* 62: 355–362
- Sim, J. B., Woo, S. H., Yook, S. J., Kim, J. B., Bae, G. N. et Oh, S. G., 2018. Baffle dust collector for removing particles from a subway tunnel during the passage of a train. *J. Mech. Sci. Tech.* 32(3): 1415–1421. <https://doi.org/doi:10.1007/s12206-018-0245-2>
- Smith J. D., Barratt, B. M., Fuller, G. W., Kelly, F. J., Loxham, M., Nicolosi, M., Priestman, M., Tremper, A. H. et Green, D. C., 2020. PM2.5 on the London Underground. *Environ. Int.* 134. <https://doi.org/doi:10.1016/j.envint.2019.105188>
- Société de transport de Montréal (STM). 2012. Vers un métro qui respire mieux - YouTube. Consultation le 3 septembre 2021, à <https://www.youtube.com/watch?v=qgBCzY7G0tI>. Publication en ligne le 25 janvier 2012.
- Son, Y. et Ryu, J., 2018. Technological advances for particulate matter collection in subway system. *KIC News*, 21(2): 24–34.
- Son, Y. S., Dinh, T. V., Chung, S. G., Lee, J. H. et Kim, J. C., 2014b. Removal of particulate matter emitted from a subway tunnel using magnetic filters. *Environ. Sci. Tech.* 48(5): 2870–2876. <https://doi.org/doi:10.1021/es404502x>

- Son, Y. S., Jeon, J. S., Lee, H. J., Ryu, I. C. et Kim, J. C., 2014a. Installation of platform screen doors and their impact on indoor air quality: Seoul subway trains. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 64(9): 1054–1061. <https://doi.org/doi:10.1080/10962247.2014.923350>
- Son, Y. S., Oh, Y. H., Choi, I. Y., Dinh, T. V., Chung, S. G., Lee, J., Park, D. et Kim, J. C., 2019. Development of a Magnetic Hybrid Filter to Reduce PM10 in a Subway Platform. *J. Hazard. Mater.* 368: 197–203. <https://doi.org/doi:10.1016/j.jhazmat.2019.01.045>
- Son, Y. S., Salama, A., Jeong, H. S., Kim, S., Jeong, J. H., Lee, J., Sunwoo, Y. et Kim, J. C., 2013. The effect of platform screen doors on PM10 levels in a subway station and a trial to reduce PM10 in tunnels. *Asian J. Atmos. Environ.*, 7 (1).
- Song, J., Lee, H., Kim, S. D. et Kim, D. S., 2008. How about the IAQ in subway environment and its management? *Asian J. Atmos. Environ.* 2: 60–67.
- Statistique Canada. 2017. Recensement en bref : Navetteurs utilisant le transport durable dans les régions métropolitaines de recensement. Catalogue no 98-200-X au catalogue de Statistique Canada. Ottawa. Date de diffusion : 29 novembre 2017. Ottawa. <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2016/as-sa/98-200-x/2016029/98-200-x2016029-fra.cfm> [Consultation le 21 octobre 2021].
- Tariq, S., Loy-Benitez, J., Nam, K., Lee, G., Kim, M., Park, D. et Yoo, C., 2021. Transfer learning driven sequential forecasting and ventilation control of PM2.5 associated health risk levels in underground public facilities. *J. Hazard. Mater.* 406. <https://doi.org/doi:10.1016/j.jhazmat.2020.124753>
- Tokarek, S. et Bernis, A., 2006. An example of particle concentration reduction in Parisian subway stations by electrostatic precipitation. *Environ. Tech.* 27(11): 1279–1287. <https://doi.org/10.1080/09593332708618746>
- Toronto Public Health, 2020. Subway Health Impacts Study. <https://www.toronto.ca/legdocs/mmis/2020/hl/bgrd/backgroundfile-141357.pdf>
- Toronto Transit Commission, 2019. Reducing Subway Wheel Flats Line 2: Community Update.
- Transport for London (TfL), 2013. Air Quality on the Underground. [En ligne] <http://content.tfl.gov.uk/air-quality-on-underground.pdf>.
- Transport for London (TfL), 2017. Mayor Launches Plan to Improve Air Quality on the Tube. [En ligne] <https://tfl.gov.uk/info-for/media/press-releases/2017/june/mayor-launches-plan-to-improve-air-quality-on-the-tube>.
- Union internationale des transports publics (UITP), 2019. Metros: The Backbone of Mobile Communities and Sustainable Cities. UITP (Union internationale des transports publics), pp. 1-6. https://cms.uitp.org/wp/wp-content/uploads/2021/04/Knowledge-Brief-Benefits-of-metro_web.pdf
- Van Ryswyk, K., Anastasopoulos, A., Evans, G., Sun, L., Sabaliauskas, K., Kulka, R., Wallace, L. et Weichenthal, S., 2017. Metro Commuter Exposures to Particulate Air Pollution and PM2.5-Associated Elements in Three Canadian Cities: The Urban Transportation Exposure Study. *Environ. Sci. Tech.*, 51(10): 5713–5720. <https://doi.org/doi:10.1021/acs.est.6b05775>
- Van Ryswyk, K., Kulka, R., Marro, L., Yang, D., Toma, E., Mehta, L., McNeil-Taboika, L. et Evans, G., 2021. Impacts of Subway System Modification on Air Quality in Subway Platforms and Trains. *Environ. Sci. Tech.* 55(16): 11133–11143. <https://doi.org/doi:10.1021/acs.est.1c00703>
- Wahlström, J., Olander, L. et Olofsson, U., 2010. Size, Shape, and Elemental Composition of Airborne Wear Particles from Disc Brake Materials. *Tribol. Lett.* 38: 15–24. <https://doi.org/doi:10.1007/s11249-009-9564-x>
- Wen, Y., Leng, J., Shen, X., Han, G., Sun, L. et Yu, F., 2020. Environmental and health effects of ventilation in subway stations: A literature review. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 17(3): 1084. MDPI AG. <https://doi.org/doi:10.3390/ijerph17031084>

Wong, R., 2019. Line 2 (Bloor-Danforth) Wheel Flats Update. Toronto Transit Commission. http://www.ttc.ca/About_the_TTC/Commission_reports_and_information/Commission_meetings/2019/July_10/Reports/9_Line_2_BD_Wheel_Flats_Update.pdf

Woo, S. H., Cheon, T. W., Lee, G., Kim, J. B., Bae, G. N., Kwon, S. B., Jang, H. R. et Yook, S. J., 2019. Performance evaluation of a hybrid dust collector for removing particles during subway train operation. *Aerosol Sci. Technol.* 53(5): 562–574. <https://doi.org/doi:10.1080/02786826.2019.1578333>

Xu, B. et Hao, J., 2017. Air quality inside subway metro indoor environment worldwide: A review. *Environ. Int.* 107: 33–46. <https://doi.org/doi:10.1016/j.envint.2017.06.016>

Xu, B., Yu, X., Gu, H., Miao, B., Wang, M. et Huang, H., 2016. Commuters' exposure to PM_{2.5} and CO₂ in metro carriages of Shanghai metro system. *Trans. Res. D: Transp. Environ.* 47: 162–170. <https://doi.org/doi:10.1016/j.trd.2016.05.001>

Yang, J., Chen, S., Quin, P., Lu, F. et Liu, A., 2018. The Effect of Subway Expansions on Vehicle Congestion: Evidence from Beijing. *J. Env. Econ. Manag.* 88: 114–33. <https://doi.org/doi:10.1016/j.jeem.2017.09.007>

Zhao, L., Wang, J., Gao, H.O., Xie, Y., Jiang, R., Hu, Q. et Sun, Y., 2017. Evaluation of particulate matter concentration in Shanghai's metro system and strategy for improvement. *Trans. Res. D: Transp. Environ.* 53: 115–127.

Zhao, Q., Xiao, Y., Lin, J., Mao, H., Zeng, Z. et Liu, Y., 2021. Measurement-based evaluation of the effect of an over-track-exhaust ventilation system on the particulate matter concentration and size distribution in a subway. *Tunn. Undergr. Sp. Tech.* 109: 10377

ANNEXE

ANNEXE A: CARTES DES PM_{2,5} DANS LES MÉTROS

FIGURE A1: Concentrations de PM_{2,5} dans le métro de Toronto (2010-2011)
[Van Ryswyk et coll., 2017]



FIGURE A2: Concentrations de PM_{2,5} dans le métro de Montréal (2010-2011)
[Van Ryswyk et coll., 2017]

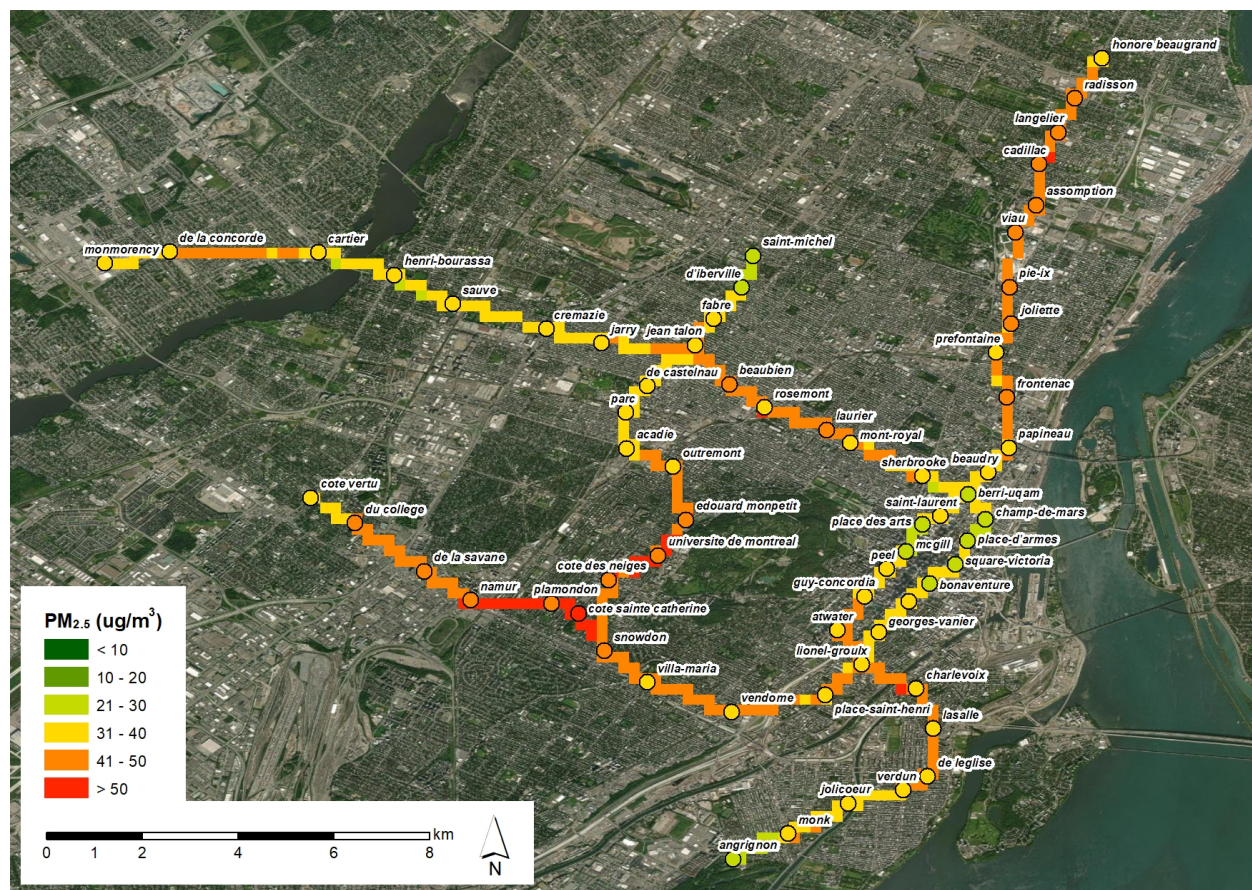


FIGURE A3: Concentrations de PM_{2,5} dans le réseau SkyTrain de Vancouver (2013)
[Van Ryswyk et coll., 2017]

