

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

DÉVELOPPEMENT DE LA MÉTHODE DE MESURE DES PARTICULES FINES
FILTRABLES ET CONDENSABLES DANS LES ÉMISSIONS ATMOSPHÉRIQUES : VERS
UN MEILLEUR CONTRÔLE DES REJETS ATMOSPHÉRIQUES

ESSAI

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR

RAFIK BOURRAI

MARS 2026

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce document diplômant se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév. 12-2023). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de maîtrise, M. David Dewez, pour son soutien et ses précieux conseils. Sa patience et ses retours détaillés m'ont permis d'approfondir mon travail, d'affiner mes analyses et de mener à bien ce projet dans de très bonnes conditions.

Je souhaite également exprimer ma profonde reconnaissance aux professionnels de la division des études de terrain du CEAEQ Laval, en particulier à M. Rassoul Mohamed et Mme Anja Moritz, qui ont généreusement partagé leurs connaissances, leur expertise et leur matériel, et qui m'ont accueilli au sein de leur équipe pour un stage essentiel à la concrétisation de ce projet.

Enfin, je tiens à remercier chaleureusement ma famille, en particulier mes chers parents Mouloud et Saliha, mes sœurs Sabrina et Rosa, mon frère Abderrahmane et son épouse Meriem, pour le soutien constant, la bienveillance et la confiance dont ils ont fait preuve à mon endroit, qui ont constitué une source de motivation et de réconfort durant cette étape importante de mon parcours universitaire.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	ii
LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.....	viii
RÉSUMÉ.....	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE ET PERSPECTIVE D’ANALYSE	3
1.1 Enjeux réglementaires normatifs des MP fines.....	3
1.2 Objectif et hypothèse de l’étude.....	4
CHAPITRE 2 LES MP FILTRABLES ET CONDENSABLES : BREF APERÇU.....	6
2.1 Définition et caractérisation	6
2.1.1 Taille et composition des particules.....	6
2.1.2 Source et origine des PM filtrables et condensables.....	7
2.1.2.1 Sources primaires directes	7
2.1.2.2 Sources secondaires	8
2.1.3 Les particules réglementées	8
2.1.4 Effets sur la santé.....	9
2.2 Les méthodes d’évaluation et les données de pollution atmosphérique au Québec.....	9
2.2.1 Portrait des émissions industrielles.....	9
2.2.2 Les enjeux de méthodes d’évaluation du réseau NAPS.....	11
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE	12
3.1 Structure de la méthode.....	12
3.2 Principe de fonctionnement.....	12
3.2.1 Partie avant : mesure des particules filtrables.....	13
3.2.2 Partie arrière : mesure des particules condensables	13
3.3 Étape du projet d’échantillonnage.....	14
3.3.1 Préparation et calibrage.....	14
3.3.2 Échantillonnage	16
3.3.3 Récupération des échantillons.....	17
3.3.4 Analyse Laboratoire.....	19
CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	21

4.1 Résultats d'analyse.....	21
4.2 Discussion.....	23
CHAPITRE 5 RÉALISATION DES OBJECTIFS ET RÉFLEXIONS CRITIQUES	24
5.1 Retour sur les objectifs de l'étude.....	24
5.2 Réflexions critiques.....	25
CONCLUSION	26
RÉFÉRENCES.....	28

LISTE DES FIGURES

Figure 1 — Déposition des différentes particules sur le système respiratoire	9
Figure 2 — Réseau national de surveillance de la pollution atmosphérique (NAPS).....	10
Figure 3 — Dispositifs du train d'échantillonnage (SPE1/RM/55)	13
Figure 4 — A. Impact de l'inertie sur la séparation des particules ; B. Combinaison d'une buse et d'un cyclone pour capturer les particules PM 2,5.....	15
Figure 5 — Étapes d'analyse des échantillons	19
Figure 6 — A. Résultats des pesées consécutives des contenants ; B. Données sur les émissions de particules totales, filtrables et condensables.	22
Figure 7 — Proportions des fractions filtrables et condensables.	23

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 — Diamètres aérodynamiques de particules de formes différentes	7
Tableau 2— catégories de particules réglementées par l'US-EPA	8
Tableau 3 — Normes de concentrations de PM _{2,5} dans l'air ambiant sur le plan mondial, national et provincial.....	10
Tableau 4 — Équipements de mesure du système d'échantillonnage selon la méthode de référence SPE 1/RM/55 — utilité fonctionnelle et nature des particules collectées.....	15
Tableau 5 — Identification et correspondance des contenants d'échantillons.....	18
Tableau 6 — Résultats d'analyse en mg	21

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

BDQAC : Base de données sur la qualité de l'air à l'échelle canadienne

CEAEQ : Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec

CPM : Condensable Particulate Matter (particules condensables)

CVÉ : Complexe de valorisation énergétique (ville de Québec)

DCM : Dichlorométhane

FPM : Filterable Particulate Matter (particules filtrables)

HPLC/CLHP : Chromatographie liquide haute performance

ISO : Organisation internationale de normalisation (International Organization for Standardization)

MP : Matières particulaires

NAPS : Réseau national de surveillance de la pollution atmosphérique

NCQAA : Normes canadiennes de qualité de l'air ambiant

OMS : Organisation mondiale de la santé

PM_{2,5} : Particulate Matter 2,5 (Particules fines de diamètre aérodynamique $\leq 2,5\mu\text{m}$)

PM₁₀ : Particulate Matter 10 (Particules inhalables de diamètre aérodynamique $\leq 10\mu\text{m}$)

PMT : Total particulate matter (toutes fractions granulométriques)

RAA : Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère (Québec)

RDOCECA : Règlement sur la déclaration obligatoire de certaines émissions de contaminants dans l'atmosphère

SPE 1/RM/8 : Méthode de référence pour la mesure des matières particulaires filtrables à partir de sources fixes (Environnement Canada)

SPE 1/RM/55 : Méthode de référence pour la mesure des matières particulaires fines filtrables et condensables à partir de sources fixes (Environnement Canada)

US-EPA: United States Environmental Protection Agency

RÉSUMÉ

Les particules fines ($PM_{2,5}$) provenant des sources industrielles fixes constituent un enjeu majeur en matière de santé publique et de qualité de l'air, surtout quand la fraction condensable, qui a été longtemps négligée, devient prépondérante. Cet essai vise à développer et valider un protocole de mesure combinée des particules fines filtrables et condensables fondé sur la sous-méthode I de la méthode de référence SPE 1/RM/55, et à en analyser les implications pour le cadre réglementaire québécois. Le travail a été réalisé en collaboration avec le Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ) au complexe de valorisation énergétique (CVÉ) de la ville de Québec. Des campagnes d'échantillonnage isocinétique ont permis de quantifier simultanément les fractions filtrables et condensables de $PM_{2,5}$ dans les gaz de cheminée issus de l'incinération des ordures ménagères. Les résultats montrent que la masse des matières particulaires condensables atteint 41 mg sur un total de 76 mg, soit 53 % des PM totales échantillonnées, en accord avec la littérature qui rapporte une contribution de 44 à 74 % des émissions totales, pour plusieurs types de sources fixes dont font partie les incinérateurs. La performance métrologique du protocole (fidélité, justesse, limites de détection, incertitudes) a été évaluée dans l'esprit des référentiels ISO/CEI 17025 et 17043, montrant la faisabilité d'une intégration systématique de la fraction condensable aux inventaires d'émission. Cette étude révèle que les réglementations actuelles sous-estiment de manière significative la charge réelle en particules fines $PM_{2,5}$, car elles se fondent uniquement sur les particules filtrables. Elle soutient la nécessité de réviser les cadres réglementaires québécois en y intégrant explicitement les particules condensables.

Mots clés : Particules fines $PM_{2,5}$; particules filtrables; particules condensables; sources stationnaires industrielles; méthode SPE 1/RM/55 (méthode I); émissions atmosphériques; inventaires d'émissions; données d'émissions; concentrations d'émissions; réglementation québécoise.

ABSTRACT

Fine particulate matter (PM_{2.5}) emitted from industrial stationary sources is a key driver of adverse health impacts and degraded air quality, especially where the condensable fraction—long overlooked in practice—represents a dominant share of primary emissions. This study aims to develop and validate a combined measurement protocol for filterable and condensable fine particles based on Sub-method I of the Canadian reference method SPE 1/RM/55, and to assess its implications for the Quebec regulatory framework. The work was conducted in collaboration with the CEAEQ at the municipal waste-to-energy facility (CVÉ) of the City of Québec, where isokinetic stack sampling campaigns were carried out to quantify simultaneously the filterable and condensable fractions of PM_{2.5} in flue gases from municipal solid waste incineration. Results indicate that condensable particulate matter accounts for 41mg out of a total of 76mg, i.e. 53% of the sampled mass, consistent with published studies reporting a contribution of 44–74% of total emissions for several types of stationary sources, including incinerators. The metrological performance of the protocol (precision, accuracy, detection limits, measurement uncertainty) was evaluated in line with ISO/IEC 17025 and ISO 17043 approaches, demonstrating the feasibility of systematically incorporating the condensable fraction into emission inventories. From a regulatory perspective, the findings show that standards and reporting thresholds based solely on filterable PM substantially underestimate the true PM_{2.5} burden, and support revising Quebec’s atmospheric emission regulations to explicitly include condensable particulate matter in emission limits and mandatory reporting requirements.

Keywords: Fine particulate matter (PM_{2.5}), filterable particulate matter, condensable particulate matter, industrial stationary sources, SPE 1/RM/55 method (Method I), atmospheric emissions, emission inventories, emission data, emission concentrations, Quebec regulation.

INTRODUCTION

Les particules fines issues des sources de combustion fixes constituent un enjeu central de la pollution atmosphérique et de la santé publique, en particulier la fraction $PM_{2,5}$, qui est associée à une augmentation accrue de la morbidité et de la mortalité à l'échelle mondiale (Sang et al., 2022 ; Vohra et al., 2021). Historiquement, la régulation et les technologies de contrôle se sont concentrées sur les particules filtrables (FPM), solides ou liquides à la température des gaz de combustion, ce qui a permis d'abaisser fortement leurs concentrations en sortie de cheminée dans de nombreux secteurs industriels (Feng et al., 2018 ; Tao et al., 2020).

Par contraste, les particules condensables (CPM) composées de précurseurs gazeux qui se transforment en particules fines lors du refroidissement et de la dilution du panache demeurent un maillon faible dans la lutte contre les $PM_{2,5}$, alors même que leur contribution au total des particules primaires devient souvent dominante après traitement des fumées (Feng et al., 2018 ; Wang et al., 2022 ; Chen et al., 2023 ; Zhang et al., 2024). De multiples études de terrain menées dans des centrales au charbon, chaudières industrielles, unités de craquage catalytique fluidisé, cimenteries et autres grandes installations montrent en effet que les CPM représentent fréquemment plus de 50 % et jusqu'à 80–90 % du total des émissions particulaires en sortie de cheminée, les concentrations de CPM dépassant régulièrement celles des FPM (Wu et al., 2021 ; Wang et al., 2024 ; Tao et al., 2020 ; Liu et al., 2023).

Les inventaires récents, par exemple en Chine, indiquent qu'en intégrant explicitement les CPM, les émissions industrielles de particules et d'aérosols organiques augmentent fortement, améliorant significativement l'ajustement des modèles de qualité de l'air aux observations et révélant une contribution non négligeable des CPM aux concentrations de $PM_{2,5}$ en période de pollution (Wang et al., 2024). Or, malgré ces constats, les cadres réglementaires nationaux et provinciaux restent largement centrés sur les fractions filtrables (PM totales, PM_{10} , $PM_{2,5}$), et les CPM sont rarement mesurées de manière systématique ni intégrées dans les obligations de déclaration, en partie à cause d'incertitudes méthodologiques persistantes sur les protocoles de mesure et la reproduction en laboratoire des mécanismes de formation de ces particules (Hao et al., 2024 ; Wang et al., 2022 ; Chen et al., 2023 ; Peng et al., 2024).

Dans ce contexte, la situation du Québec, où les normes de rejets particulaires et les seuils de déclaration obligatoire se focalisent principalement sur les PM filtrables, offre un cas d'étude particulièrement pertinent pour analyser le retard normatif entourant les CPM, ses implications sur la justesse des inventaires d'émissions et l'efficacité des politiques de gestion de la qualité de l'air, ainsi que les perspectives ouvertes

par les récentes avancées métrologiques et technologiques (Feng et al., 2018 ; Wang et al., 2022 ; Peng et al., 2024 ; Le et al., 2025).

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE ET PERSPECTIVE D'ANALYSE

1.1 Enjeux réglementaires normatifs des MP fines

Les particules condensables (CPM), qui complètent les particules filtrables (FPM) dans le total des particules primaires émises issues des sources fixes, restent aujourd'hui un maillon faible de la régulation de la pollution particulaire, alors même que les politiques de réduction des PM se sont considérablement renforcées à l'échelle mondiale (Feng, Li, et Cui, 2018 ; Wang et al., 2022). Les cadres normatifs et les inventaires nationaux se focalisent très majoritairement sur les fractions filtrables (PMT, PM_{2,5}). Au Québec, il existe deux cadres normatifs principaux. Premièrement, Le Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère (RAA) établit les concentrations maximales permises de PM totales émises dans l'atmosphère par une installation industrielle. Ces normes de concentrations varient selon la nature de l'installation, selon la capacité nominale d'alimentation et la nature des matières brûlées ou détruites. Par exemple, selon l'article 104 de la section II du règlement sur l'assainissement de l'atmosphère (gouvernement du Québec, 2014). «Un incinérateur ne doit pas rejeter des gaz de combustion dans l'atmosphère contenant une concentration de particules totales supérieure à 20 mg/m³, cependant, dans le cas d'une installation ayant une capacité nominale d'alimentation inférieure à une tonne par heure et qui ne brûle pas de matières dangereuses résiduelles ou de déchets biomédicaux, cette valeur limite est portée à 50 mg/m³». Le second cadre normatif est le Règlement sur la déclaration obligatoire de certaines émissions de contaminants dans l'atmosphère qui encadre les sources stationnaires, selon l'article décrit dans la partie II de l'annexe A, aucun seuil de déclaration obligatoire n'est fixé pour les émissions atmosphériques de PM totales, de PM₁₀ et de PM_{2,5} (gouvernement du Québec, 2022). Bien que les PM_{2,5} soient réglementées au Québec et que leur caractérisation soit fréquemment exigée par le ministère pour la délivrance de permis ou de certificats d'autorisation, les particules condensables (CPM) ne font l'objet ni de mesures systématiques ni d'intégration dans les bilans d'émissions. Cette étude vise ainsi à élucider cette problématique majeure.

De nombreuses études de terrain montrent que, dans les grandes installations de combustion et d'industrie, telles que les centrales au charbon, les chaudières industrielles, la sidérurgie et les cimenteries, les CPM représentent fréquemment de 50 à plus de 80 % du total des particules émises en sortie de cheminée, et que la prise en compte explicite de cette fraction peut multiplier par deux à sept les inventaires d'aérosols organiques pour un même territoire ou secteur (Wu et al., 2021 ; Choi et al., 2021 ; Morino et al., 2018 ; Li et al., 2022). Comme l'illustrent notamment les cas du Japon et de la Chine, où les protocoles officiels de

mesure en sources stationnaires ont longtemps ignoré cette fraction, conduisant à une sous-estimation importante des émissions réelles de PM et d'aérosols organiques (Morino et al., 2018 ; Li et al., 2022).

Les études des synthèses de littérature montrent que le retard normatif sur les CPM est bien réel, principalement parce que l'historique des réglementations sur les émissions atmosphériques s'est d'abord concentré sur les particules filtrables (FPM), initialement beaucoup plus abondantes, ce qui a conduit à un fort développement des technologies de contrôle et de mesure des FPM, tandis que les CPM n'étaient que rarement mesurées et ne faisaient presque pas l'objet d'exigences réglementaires explicites (Corio & Sherwell, 2000 ; Feng, Li, et Cui, 2018). Cette focalisation historique sur les FPM explique que, dans de nombreux secteurs industriels, les réglementations se limitent encore au contrôle des FPM alors que les CPM peuvent représenter une part égale ou majoritaire du total des émissions particulières (Cano et al., 2021 ; Bian et al., 2023 ; Wang et al., 2022). Parallèlement, la littérature souligne que plusieurs incertitudes entourent les méthodes de mesure des CPM, en l'occurrence, sur la difficulté de reproduire le mécanisme de formation de ces particules en question (Huang et al., 2020 ; Corio et Sherwell, 2000). Plusieurs recherches récentes proposent des dispositifs innovants, ou des systèmes de mesure en continu pour les CPM inorganiques, mais ces approches sont encore en phase de développement et ne sont pas harmonisées ni largement standardisées sur le plan international (Liu et al., 2022 ; Le et al., 2025). Les inventaires d'émissions qui sont demeurés lacunaires longtemps, ont été développés très récemment, à l'exemple de la méthode d'échantillonnage simultanée des fractions filtrables et condensables « SPE 1/RM/55 » publiée pour la première fois en 2013 par environnement Canada, testée et validée par le ministère de l'Environnement à travers sa filière, le centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, en été 2025.

Dans ce contexte, le fait que les PM condensables ne soient ni pleinement normées ni systématiquement mesurées apparaît comme un verrou scientifique, technique et réglementaire majeur. Tant que cette fraction majoritaire de particules restera en dehors des limites et des systèmes de surveillance, les politiques de gestion de la qualité de l'air risquent de s'appuyer sur des inventaires incomplets et de sous-estimer considérablement la charge réelle en PM et les risques pour la santé qui y sont associés (Feng et al., 2018 ; Wang et al., 2022 ; Morino et al., 2018).

1.2 Objectif et hypothèse de l'étude

L'objectif principal de cette étude consiste à évaluer et valider les performances métrologiques de la méthode combinée SPE 1/RM/55, intégrant la mesure simultanée des particules filtrables et condensables,

pour la détermination précise des concentrations massiques de $PM_{2,5}$ émises par les sources stationnaires industrielles.

Les objectifs spécifiques de notre étude sont les suivants :

- Établir un protocole de mesure optimisé intégrant les exigences de la Méthode I de SPE 1/RM/55 adapté aux caractéristiques technologiques et infrastructurelles des installations industrielles québécoises.
- Quantifier la contribution relative de la fraction condensable au sein des émissions totales de $PM_{2,5}$ pour une sélection représentative de sources industrielles québécoises, en particulier pour les sources où cette fraction est estimée contribuer entre 44 et 74 % des émissions totales.
- Évaluer la performance métrologique du protocole selon les critères de précision, d'exactitude, de répétabilité et de robustesse définis dans les normes ISO 17043 et ISO/CEI 17025, relatives à la compétence des laboratoires d'essai et de calibrage.
- Comparer les données d'émission obtenues par la Méthode I (filtrables + condensables) avec les normes d'émission actuellement prescrites par le Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère pour déterminer si les limites actuelles sont sous-estimées en raison de l'omission de la fraction condensable.
- Quantifier l'impact potentiel de l'intégration des PM condensables sur les seuils de déclaration obligatoire en vertu du Règlement sur la déclaration obligatoire de contaminants, afin de démontrer comment ces données pourraient modifier le classement des installations industrielles comme sources significatives de pollution particulière.

L'hypothèse principale avancée est que l'intégration des PM condensables dans les inventaires d'émissions de $PM_{2,5}$ totales permettrait d'estimer la totalité des émissions, identifier l'ampleur des risques associés à ces dernières. Et fournir une donnée fiable d'aide à la décision pour la révision des seuils de déclaration obligatoire et justifiant l'adoption de limites d'émissions spécifiques pour les PM totales dans les permis environnementaux au Québec. Cette hypothèse est réconfortée par l'étude de Yang et al. (2014), qui ont mesuré les émissions de particules fines filtrables et condensables ($PM_{2,5}$) issues de cinq différentes sources stationnaires industrielles, les centrales électriques, les chaudières, les usines de fabrication de briques, les incinérateurs et les fonderies. En utilisant les méthodes 201 et 202A de l'US-EPA, ils conclurent que la fraction condensable constitue une part importante des émissions totales et que son omission entraîne une sous-estimation notable des rejets atmosphériques dans les régions les plus touchées par la pollution atmosphérique au Québec, notamment au sein des grandes agglomérations urbaines, comme la ville de Montréal.

CHAPITRE 2

LES MP FILTRABLES ET CONDENSABLES : BREF APERÇU

Les particules fines filtrables et condensables et leurs impacts sur la santé publique, le climat et la qualité de l'air constituent un domaine de recherche en expansion constante dans les sciences environnementales et l'ingénierie de la qualité de l'air. Les travaux fondateurs de l'United States Environmental Protection Agency (2010), Yang et al. (2014) et Corio et Sherwell (2000) ont établi les bases méthodologiques pour la distinction et la quantification de ces deux fractions. Les études subséquentes de Li et al. (2022) et de Cano et al. (2021) ont approfondi la caractérisation chimique des émissions. Les défis méthodologiques associés à l'estimation de ces émissions, notamment les artefacts de mesure et la variabilité temporelle, sont documentés dans les travaux de Roper et al. (2018). Ce chapitre présente les notions essentielles sur les méthodes d'estimation des PM filtrables et condensables qui serviront de fondement aux développements méthodologiques et aux analyses réglementaires développées dans les sections suivantes.

2.1 Définition et caractérisation

Les matières particulaires fines, communément désignées par l'acronyme $PM_{2,5}$, sont l'ensemble des particules en suspension dans l'atmosphère, dont le diamètre aérodynamique est inférieur ou égal à 2,5 micromètres (μm). Ces particules peuvent être décrites par leur manière de se former, leur composition et leur taille.

2.1.1 Taille et composition des particules

Les MP fines contenues dans un flux gazeux ont des tailles et des formes variées. Les particules générées par les procédés chimiques et physiques sont généralement sphériques. Celles qui sont issues des procédés physiques, comme le broyage, sont de formes irrégulières (Tab.1). Le déplacement de ces particules dans le flux gazeux tient compte de leur « diamètre aérodynamique », à ne pas confondre avec le diamètre physique, le terme de diamètre aérodynamique a été développé par les physiciens dans le but de définir, avec une seule dimension, les particules ayant des formes et des densités différentes.

Le diamètre aérodynamique dépend principalement du diamètre physique et de la densité de la particule. Il est égal au diamètre physique de la particule (d_p) multipliée par la racine carrée du produit de la densité de la particule (ρ_p) et du facteur de correction de Cunningham. Ce facteur est défini comme le coefficient de

correction de la loi de traînée de Stokes pour les effets de glissement moléculaire (slip flow) autour des particules submicroniques. Il est donné par l'équation suivante :

$$d_a = d_p \sqrt{\rho \cdot C_c}$$

Tel que :

d_a : Diamètre aérodynamique de la particule (μm)

d_p : Diamètre physique de la particule (μm)

ρ : Densité de la particule (g/cm^3)

C_c : Facteur de correction de Cunningham

Selon ce principe, deux particules de formes physiques et densités différentes possédant un diamètre aérodynamique équivalent auront un comportement dynamique identique dans l'air. C'est-à-dire, la même vitesse de déplacement dans le flux gazeux (Tab.1).




	Sphère pleine	$\rho = 2\text{g}/\text{cm}^3$ $d_p = 1,4\mu\text{m}$	$d_a = 2\mu\text{m}$
	Sphère creuse	$\rho = 0,5\text{g}/\text{cm}^3$ $d_p = 2,8\mu\text{m}$	
	Forme irrégulière	$\rho = 2,4\text{g}/\text{cm}^3$ $d_p = 1,3\mu\text{m}$	

Tableau 1 — Diamètres aérodynamiques de particules de formes différentes

2.1.2 Source et origine des PM filtrables et condensables

Les MP peuvent être formées de deux manières différentes, par l'émission directe à la source par une source primaire ou indirectement par une source secondaire.

2.1.2.1 Sources primaires directes

Ce sont les particules directement émises dans l'atmosphère par les activités humaines ou naturelles. La combustion du carburant fossile (transport, moteurs), les installations industrielles et la combustion de la biomasse (les feux de forêt, les brûlis agricoles et le chauffage résidentiel au bois) sont des exemples de sources primaires. Ces particules sont émises telles quelles.

2.1.2.2 Sources secondaires

Elles se forment dans l’atmosphère à partir de gaz précurseurs (SO₂, NO_x, NH₃, COV) qui réagissent pour donner des particules fines solides ou liquides. Les sulfates, nitrates et ammoniums sont des exemples typiques de PM_{2,5} secondaires.

Les émissions en provenance de sources industrielles contribuent seulement à 6 % à la masse totale de PM_{2,5} à Montréal, selon Fakhri et al en 2024, mais leur contribution à l’échelle de la province du Québec reste non quantifiée. Cependant, les sources industrielles dominent les concentrations de métaux toxiques, contribuant à hauteur de 70 à 90 % au cuivre et au cobalt, qui augmentent le risque de cancer (Riffault et al., 2015 ; Bari et Kindzierski, 2016, et Masselot et al., 2019). Et d’après notre hypothèse de départ, nous estimons que cette contribution pourrait être minime sans l’inclusion des fractions condensables. Dans le reste du Québec, la contribution des différentes sources à la masse des PM_{2,5} n’est pas répertoriée.

2.1.3 Les particules réglementées

Étant donné que les particules de tailles différentes se comportent différemment dans l’atmosphère et le système respiratoire, il a été utile de les diviser en catégories de particules, afin de mieux les évaluer. Nous avons distingué cinq catégories de particules réglementées par l’US-EPA, en évaluation atmosphérique à partir de sources fixes, présentées dans le tableau suivant (Tab.2) :

Tableau 2— catégories de particules réglementées par l’US-EPA

Catégorie de particules	Granulométrie	Description des particules
TSP	$da \geq 10\mu\text{m}$	Particules totales en suspension
PM10	$2.5 \mu\text{m} \leq da \leq 10 \mu\text{m}$	Grossières
PM _{2,5}	$0.1 \mu\text{m} \leq da \leq 2.5\mu\text{m}$	Fines
CPM	$0.1 \mu\text{m} \leq da \leq 2.5\mu\text{m}$	Condensables
PM 0,1	$da \leq 0.1\mu\text{m}$	Ultrafines

Bien que toutes ces fractions de particules soient réglementées (US-EPA, 2013), les matières particulaires ultrafines et condensables demeurent non-normées à l’échelle québécoise, canadienne et internationale.

2.1.4 Effets sur la santé

Les mécanismes de déposition des différentes particules dépendent de leur taille, de sorte que les particules plus grandes à $10\ \mu\text{m}$ peuvent pénétrer jusqu'à la partie supérieure du système respiratoire, soit le nez et la trachée. Les particules entre un et $10\ \mu\text{m}$ ont tendance à s'accumuler dans la partie médiane du système respiratoire, soit la région trachéobronchique, tandis que les particules de $1\ \mu\text{m}$ ont tendance à se déposer au niveau des bronches et bronchioles. Les particules de diamètre inférieur à $1\ \mu\text{m}$ peuvent pénétrer dans les alvéoles où l'oxygène est transféré au sang. Les $\text{PM}_{2,5}$ sont donc susceptibles d'atteindre les bronches, les bronchioles et les alvéoles pulmonaires. La figure 1 illustre le système respiratoire et les particules qui s'y déposent.

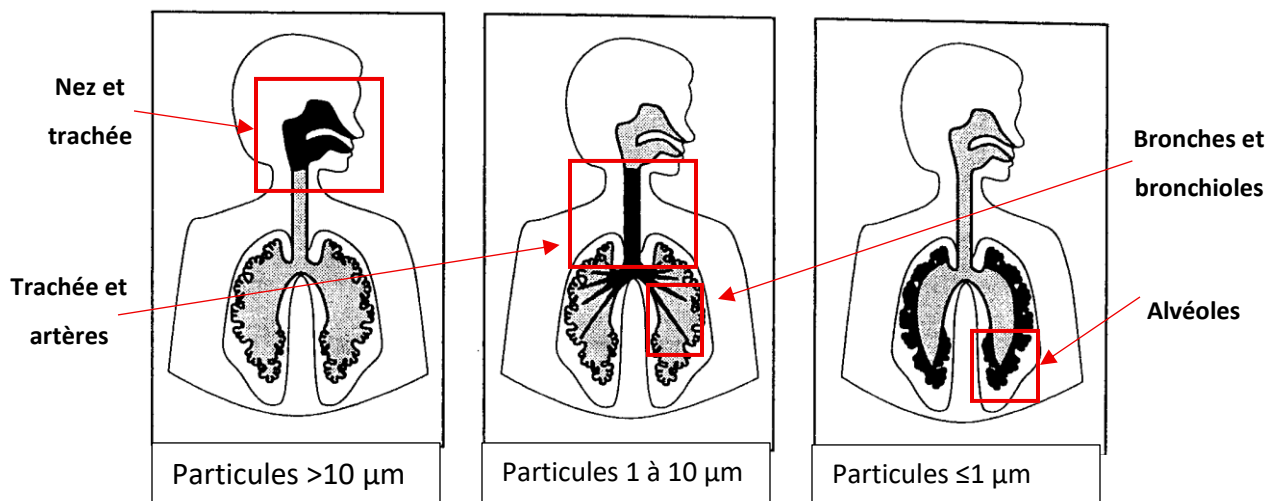


Figure 1— Déposition des différentes particules sur le système respiratoire

2.2 Les méthodes d'évaluation et les données de pollution atmosphérique au Québec

2.2.1 Portrait des émissions industrielles

Les données horaires sur la concentration de $\text{PM}_{2,5}$ au Canada sont fournies par le réseau national de surveillance de la pollution atmosphérique (NSPA). Le réseau national de surveillance de la pollution atmosphérique (NAPS) constitue la principale source de données sur la qualité de l'air ambiant. Il compte près de 260 stations situées dans 150 collectivités rurales et urbaines qui transmettent des données

incorporées à la base de données sur la qualité de l'air à l'échelle canadienne (BDQAC) (gouvernement du Canada, 2026). La figure 2 suivante présente la carte des stations NAPS au Canada.



Figure 2 — Réseau national de surveillance de la pollution atmosphérique (NAPS)

De nouvelles normes canadiennes de qualité de l'air ambiant (NCQAA) ont été récemment adoptées. Ces normes entreront en vigueur en 2030, fixant des limites plus strictes à $8\mu\text{g}/\text{m}^3$ (moyenne annuelle) et $23\mu\text{g}/\text{m}^3$ (moyenne journalière), poussant le Québec à envisager l'alignement de ses normes sur ces nouvelles références. Le tableau 3 suivant permet de faire un état des lieux sur les normes actuelles (TAB. 3).

Tableau 3 — Normes de concentrations de $\text{PM}_{2,5}$ dans l'air ambiant sur le plan mondial, national et provincial

Juridiction	Moyenne annuelle ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Moyenne en 24 h ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
OMS	5	15
Canada	8	23
Québec	n/a	30

*n/a : non attribuée.

2.2.2 Les enjeux de méthodes d'évaluation du réseau NAPS

Les méthodes de mesure en continu du réseau NAPS présentent plusieurs limites structurelles qui soulèvent d'importants enjeux pour la caractérisation des $PM_{2,5}$ et l'évaluation des risques. D'abord, les prélèvements sur filtres ne sont réalisés qu'une fois tous les trois ou six jours, sur des périodes de 24 h, ce qui réduit fortement la résolution temporelle des données et ne permet pas de capturer de façon fiable les extrêmes de la distribution des concentrations, ce calendrier d'échantillonnage peut tout simplement omettre les journées où les niveaux de $PM_{2,5}$ sont particulièrement élevés (épisodes de fumées de feux de forêt, pics industriels, stagnation atmosphérique) ou au contraire très faibles, entraînant une sous-estimation potentielle des pics d'exposition et des dépassements de normes journalières (Fakhri et al., 2024). Ensuite, sur le plan chimique, le programme de spéciation $PM_{2,5}$ du NAPS s'est historiquement concentré sur un nombre restreint de paramètres (carbone élémentaire et organique, éléments, principaux ions inorganiques), avec très peu de données sur les marqueurs organiques spécifiques, alors que ces composés constituent des traceurs essentiels pour discriminer les sources (transport, combustion de biomasse, procédés industriels, aérosols secondaires organiques) (Fakhri et al., 2024). Ces enjeux méthodologiques plaident en faveur de l'impératif du développement de nouvelles méthodes de prélèvement et du renforcement du dispositif de surveillance, notamment par l'adoption de mesures quasi continues pour accroître la résolution temporelle et l'élargissement systématique du panel de traceurs organiques, incluant spécifiquement les fractions condensables. Telle est la problématique qui motive les objectifs de cette étude.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

Afin d'orienter et de soutenir notre intervention dans la résolution de cette problématique, nous avons utilisé la sous-méthode « I » de la méthode de référence pour le contrôle à la source des émissions de matières particulaires fines à partir de sources fixes « SPE 1/RM/55 » d'Environnement Canada en décembre 2013, constitue le prolongement logique de la méthode SPE 1/RM/8 (décembre 1993), qui, dans un premier temps, établissait les procédures normalisées pour la mesure des émissions de matières particulaires filtrables à partir de sources fixes. Cette nouvelle méthode « SPE 1/RM/55 » répond au besoin de quantifier non seulement les particules filtrables, mais également les matières particulaires condensables (MPC). Cette méthode constitue un guide exhaustif à la fois technique et normatif des recommandations pour le prélèvement isocinétique d'échantillons représentatifs, le contrôle qualité et les limites d'utilisation des méthodes imposées par les conditions de fonctionnement des procédés industriels. Les méthodes « SPE1/RM/8 » et « SPE1/RM/55 » sont directement inspirées des méthodes de l'US EPA « 201A » et « 202 » respectives.

3.1 Structure de la méthode

Le rapport « SPE 1/RM/55 » comprend trois méthodes principales :

- méthode « G » : détermination des $PM_{2,5}$ filtrables
- méthode « H » : détermination des matières particulaires condensables (MPC)
- Méthode « I » : La méthode « I » du rapport « SPE 1/RM/55 » constitue une approche intégrée permettant la détermination simultanée des $PM_{2,5}$ filtrables, et des matières particulaires condensables en un seul train d'échantillonnage. Cette sous-méthode combine les procédures de la méthode « G » et de la méthode « H ».

3.2 Principe de fonctionnement

La méthode SPE 1/RM/55 repose sur un principe de fonctionnement en deux grandes parties : une partie avant dédiée aux particules filtrables et une partie arrière consacrée aux particules condensables, toutes deux intégrées dans un même train d'échantillonnage.

3.2.1 Partie avant : mesure des particules filtrables

Les gaz de cheminée sont d'abord aspirés de manière isocinétique à travers une buse adaptée à la vitesse du flux, puis dirigés vers un cyclone qui sépare les particules de diamètre supérieur à $2,5\mu\text{m}$. Les particules $\text{PM}_{2,5}$ ainsi sélectionnées passent ensuite par une sonde chauffée jusqu'à un porte-filtre chauffé maintenu à $120\text{ °C} \pm 14\text{ °C}$, sur lequel est monté un filtre en fibre de verre. Ce filtre capte les particules solides et liquides déjà présentes sous forme particulaire dans les gaz chauds (particules filtrables). À la fin de l'échantillonnage, ce filtre est pesé pour déterminer la masse des $\text{PM}_{2,5}$ filtrables.

3.2.2 Partie arrière : mesure des particules condensables

Après filtration, les gaz continuent leur chemin vers la partie arrière du train, dédiée aux particules condensables. Ils passent d'abord par un condenseur à serpentin, qui refroidit progressivement les gaz, favorisant la condensation des vapeurs. Un filtre secondaire permet de récupérer les particules déjà condensées à ce stade. Les gaz, désormais plus froids, sont ensuite dirigés vers des barboteurs contenant du gel de silice, qui capture les composés organiques et inorganiques en phase vapeur qui se condensent. Enfin, les gaz sortent du train et sont aspirés par la pompe vers le compteur à gaz de type sec, qui permet enfin de mesurer le volume de gaz échantillonné, dans les conditions de références sèches. La figure 3 représente le train d'échantillonnage en question.

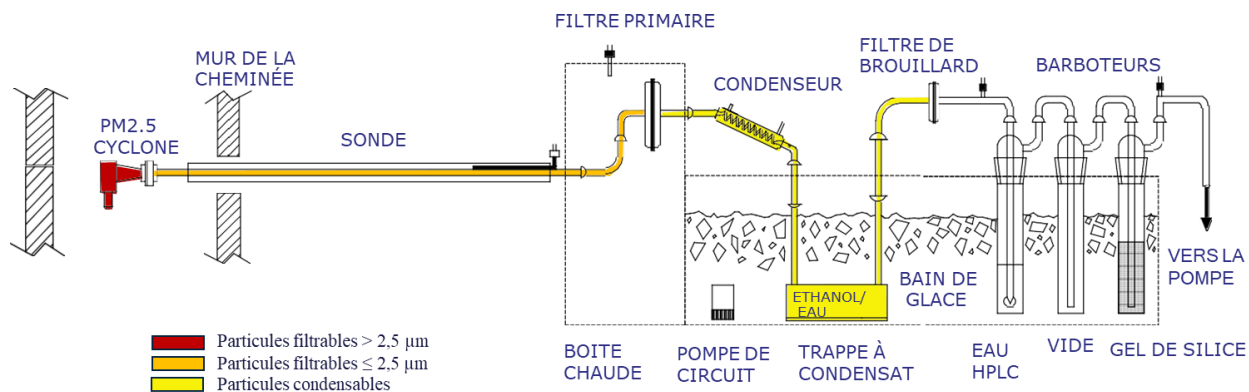


Figure 3 — Dispositifs du train d'échantillonnage (SPE1/RM/55)

La zone identifiée en rouge concerne la zone de séparation des particules de diamètre supérieur à $2,5\mu\text{m}$, la partie orange désigne la zone de séparation des particules filtrables de taille inférieure à $2,5\mu\text{m}$, et en jaune la zone de formation des particules condensables.

L'ensemble du dispositif fonctionne en prélèvement isocinétique à débit constant, et le diamètre de coupe des particules aspirées doit être inférieur ou égal à $2,5\mu\text{m}$, cette sélection est possible et dépend

principalement de la taille de la buse utilisée sur le cyclone, nous allons expliquer en détail dans la section suivante. Les particules déjà présentes dans les gaz chauds sont collectées sur le filtre et tous les compartiments de la partie avant identifiée en couleur orange dans la figure 3-1, tandis que les vapeurs qui se condensent lors du refroidissement sont capturées dans tous les compartiments de la partie arrière identifiée en couleur jaune. La masse des particules filtrables et condensables est ensuite déterminée par pesée gravimétrique. La détermination simultanée du taux d'humidité, du débit, de la température et de la masse molaire du flux gazeux permet de calculer la concentration et le taux d'émissions des deux fractions séparément, puis de les sommer pour obtenir les $PM_{2,5}$ totales émises par la source, avec une limite de détection gravimétrique de 0,42 mg et une incertitude étendue de 1,5 mg à 95 % de confiance.

Le développement de cette méthode a été réalisé en collaboration avec le Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, durant l'été 2025, au niveau des cheminées du complexe de valorisation énergétique (CVÉ) de la ville de Québec, dans le but de quantifier les particules fines émises dans l'atmosphère par le procédé d'incinération des ordures ménagères.

3.3 Étape du projet d'échantillonnage

Dans la réalisation de ce projet, les étapes ont été structurées en quatre phases distinctes : la préparation et le calibrage des équipements, l'échantillonnage, la récupération des échantillons, et l'analyse en laboratoire.

3.3.1 Préparation et calibrage

D'abord, une identification et une familiarisation avec les équipements de mesure (Fig. 3) ont été réalisées, afin de mieux appréhender l'utilité fonctionnelle de chaque compartiment de la ligne d'échantillonnage et la nature des particules qu'il piège. Les buses et le cyclone assurent la sélection des particules fines ($PM_{2,5}$) dans le flux de gaz échantillonné. Selon le principe d'inertie (Sommerfeld et al., 2024), les particules de diamètre aérodynamique supérieur à $2,5\mu\text{m}$ se déposent sur la partie inférieure des parois du cyclone. La figure suivante montre le processus de séparation des particules au niveau de la buse et du cyclone.

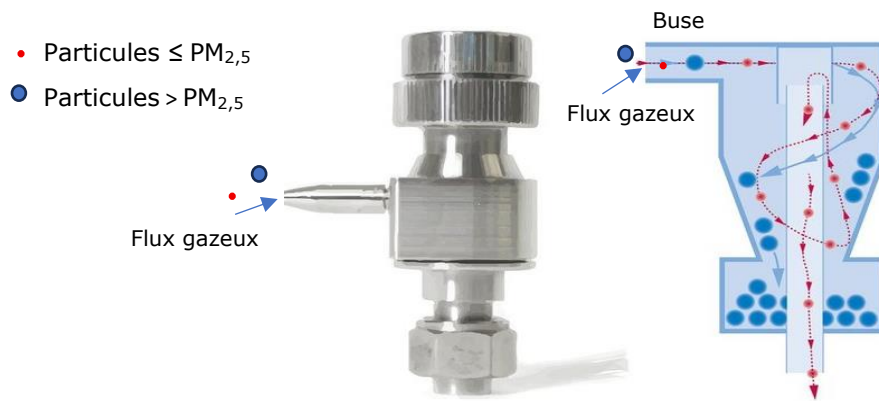


Figure 4 — A. Impact de l’inertie sur la séparation des particules ; B. Combinaison d’une buse et d’un cyclone pour capturer les particules PM 2,5.

Les particules de diamètre inférieur ou égal à $2,5\mu\text{m}$ continuent leur mouvement en suivant le trajet du flux gazeux et sont acheminées à la sonde, puis vers le porte-filtre primaire et la section de condensation. Le système de chauffage maintient la température du flux gazeux pour éviter toute condensation prématurée. Le porte-filtre primaire recueille les particules filtrables solides. Tandis que le serpentin du condenseur, la trappe à condensat ainsi que le filtre de brouillard permettent la collecte des fractions condensables. Les instruments auxiliaires, tels que les impacteurs, la pompe à vide, le tube de Pitot, les capteurs de température, le compteur à gaz et le baromètre, servent à contrôler les paramètres essentiels de l’échantillonnage, en l’occurrence l’humidité, le débit, pression, température et volume de gaz prélevé. Le tableau (4) présente les principaux équipements utilisés dans le processus d’échantillonnage conforme à la méthode utilisée.

Tableau 4 — Équipements de mesure du système d’échantillonnage selon la méthode de référence SPE 1/RM/55 — utilité fonctionnelle et nature des particules collectées.

ÉQUIPEMENT	UTILITÉ FONCTIONNELLE	NATURE DE LA PARTICULE CIBLÉE
Buse et cyclone des PM_{2,5}	Séparer les particules selon leur diamètre aérodynamique	Filtrables > PM _{2,5}
Sonde	Acheminer le flux gazeux	Filtrables ≤ PM _{2,5}

Tube de Pitot	Mesurer la pression dynamique des gaz pour le calcul de la vitesse du flux gazeux	Aucune
Porte-filtre primaire	Retenir les particules solides filtrables	Filtrables \leq PM _{2,5}
Serpentin du condenseur	Refroidir les gaz	Condensables \leq PM _{2,5}
Trappe à condensat	Retenir les particules condensables	Condensables \leq PM _{2,5}
Porte-filtre de brouillard	Recueillir les particules condensables	Condensables \leq PM _{2,5}
Impacteurs	Recueillir l'eau condensée (humidité)	Aucune
Pompe à vide	Aspirer constamment le flux de gaz	Aucune
Compteur à gaz de type sec	Mesurer le volume de gaz prélevé	Aucune
Capteurs de température	Mesurer la température	Aucune

Pour des prélèvements représentatifs, nous avons réalisé en collaboration avec l'équipe du projet, la calibration du compteur à gaz de type sec à l'aide d'un spiromètre au niveau du laboratoire. J'ai également procédé à l'étalonnage du montage sonde et tube de Pitot de type S à la soufflerie de la ville de Montréal, située à la station d'épuration des eaux usées de Pointe-aux-Trembles. Conformément à la méthode, cette calibration du tube de Pitot a été effectuée en association avec le cyclone PM_{2,5} ainsi qu'avec la buse prévue pour les prélèvements du projet.

3.3.2 Échantillonnage

L'échantillonnage des particules fines PM_{2,5} et des matières particulaires condensables s'est déroulé de manière isocinétique à débit constant, c'est-à-dire, la vitesse du flux de gaz qui entre dans la buse

d'échantillonnage doit être la même que celle du flux gazeux non perturbé au point d'échantillonnage. Le pourcentage d'isocinétisme qui représente le rapport de la vitesse d'échantillonnage à celle des gaz doit se situer dans une plage de tolérance comprise entre 80 % et 120 %. La particularité de cette méthode est qu'elle est soumise à une seconde condition, celle du diamètre de coupe, qui doit être maintenu entre 2,25µm et 2,75µm, conformément aux exigences méthodologiques.

Des essais préliminaires ont précédé le prélèvement isocinétique, afin de déterminer les paramètres d'échantillonnage. La composition des gaz, en particulier l'oxygène, le dioxyde de carbone et le monoxyde de carbone, ont été réalisés à l'aide d'un analyseur de type Nova SP345. La teneur en humidité a été obtenue en prélevant un volume connu de gaz et en mesurant le volume d'eau condensée dans les barboteurs. Ces mesures ont permis le calcul de la masse molaire du gaz sec et de la masse molaire du gaz humide. Le diamètre de la cheminée, la température, la pression statique et absolue ont également été mesurés. Ces paramètres ont permis de calculer le nombre de points de section correspondants, la profondeur de chaque point, la vitesse des gaz et les débits volumiques, le diamètre exact de la buse à utiliser, la chute de pression différentielle à appliquer au débitmètre à diaphragme pour le maintien des conditions isocinétiques, ainsi que le temps de séjour, c'est-à-dire le temps de prélèvement avant de passer au prochain point de section. Dans notre cas, les prélèvements ont été réalisés sur six points de section du diamètre de la cheminée. La buse utilisée était la buse numéro 4 de diamètre 0,174 pouce ou 4,42mm. La pression différentielle correspond à 0,38 pouce de H₂O en unités impériales.

Un minimum de trois prélèvements valides est requis pour assurer la fiabilité des résultats. Chaque prélèvement doit avoir une durée supérieure à deux heures et permettre la collecte d'un volume minimal de 1,5m³ (53 pieds cubes) de gaz dans les conditions de références sèches. Les conditions de référence sont une température de 25°C et une pression de 101,3kPa. Dans le cadre de cette étude, trois prélèvements distincts ont été réalisés sur trois jours consécutifs, chacun d'une durée de trois heures. La campagne d'échantillonnage s'est déroulée au complexe de valorisation énergétique de la ville de Québec.

Les données de prélèvement ont été enregistrées sur les feuilles de données de terrain.

3.3.3 Récupération des échantillons

La récupération des échantillons a été effectuée avec beaucoup de précautions. Chaque étape visait à assurer une collecte exhaustive des résidus et à minimiser les pertes analytiques, tout en garantissant la traçabilité des contenants. Les bouteilles de verre ambré de récupération ont été préalablement étiquetées. Le tableau suivant (TAB. 5) illustre la méthode d'identification des contenants ainsi que la correspondance établie entre chaque contenant et son contenu.

Tableau 5 — Identification et correspondance des contenants d'échantillons

N° de contenant	Description
1	Rinçages à l'eau et à l'acétone du cyclone et de la buse
2	Rinçages à l'eau et à l'acétone du tube de sortie du cyclone, du revêtement de la sonde et de la moitié avant du porte-filtre
3	Filtre primaire
4	Condensé, trempages, rinçages à l'eau de qualité CLHP de la moitié arrière du porte-filtre primaire, du condenseur, des raccords de verre et de la moitié avant du filtre de brouillard
5	Trempages et rinçages au dichlorométhane de la moitié arrière du porte-filtre primaire, du condenseur, des raccords de verre et de la moitié avant du filtre de brouillard
6	Filtre de brouillard
7	Blanc d'eau/acétone de qualité CLHP
8	Blanc d'eau/éthanol
9	Blanc de dichlorométhane
10	Blanc du filtre de brouillard

Le rinçage du cyclone PM_{2,5} a d'abord été réalisé avec 100 ml d'eau (contenant 01), en lavant soigneusement les surfaces intérieures de la buse et du cyclone à l'aide d'une brosse. Le même procédé a ensuite été répété à l'acétone dans le même contenant (01). Le tube de sortie du cyclone, le revêtement de la sonde et la moitié avant du porte-filtre primaire ont également été rincés, d'abord à l'eau, puis à l'acétone dans le même contenant (02), en appliquant la même méthode de lavage et de brossage sur les surfaces internes.

Le filtre primaire (contenant 03) a été transféré avec précaution dans une boîte de Petri afin de préserver l'intégrité des particules déposées. Ensuite, la moitié arrière du porte-filtre primaire, le serpentin du condenseur, la trappe à condensat, les raccords de verre et la moitié arrière du porte-filtre de brouillard ont été rincés trois fois avec 100 ml d'eau de qualité HPLC (contenant 04). Un trempage de cinq minutes dans cette eau a permis de récupérer les résidus adhérents, puis les produits de rinçage et de trempage ont été regroupés dans le même contenant.

Les mêmes surfaces ont ensuite subi un traitement au dichlorométhane. Après un trempage de cinq minutes au DCM, trois rinçages successifs de 100 ml chacun ont été effectués, puis les produits de lavage ont été versés dans le contenant (05). Le filtre de brouillard est mis dans une boîte de Petri (contenant 06).

Pour un seul essai, six contenants ont été utilisés, soit quatre bouteilles et deux boîtes de Petri qui contiennent les deux filtres, le filtre primaire et le filtre de brouillard. Pour assurer le contrôle qualité du protocole, trois blancs analytiques ont été préparés, le blanc d'eau-acétone, de l'eau-éthanol, le blanc du dichlorométhane et le blanc du filtre de brouillard, correspondant aux contenants (07, 08, 09 et 10) respectivement. Étant donné qu'au moins trois essais sont requis, le nombre total de contenants s'élève à quinze (15) bouteilles et six (6) boîtes de Petri.

3.3.4 Analyse Laboratoire

À la réception des échantillons, chaque contenant a été vérifié afin de s'assurer qu'aucune fuite de liquide n'était survenue. Afin d'optimiser l'analyse, le contenu des flacons de verre ambré a été transféré dans des béchers préalablement pesés et laissés au dessiccateur pour plus de 24 heures jusqu'à l'utilisation. Dans les feuilles de données analytiques, les béchers numérotés de 1 à 15 ont été identifiés comme correspondant aux 15 contenants. Par ailleurs, l'humidité relative de la pièce de pesée ne devrait pas dépasser 50 % d'après la méthode de référence. Elle a été mesurée à l'aide d'un psychromètre digital « REED ».

L'analyse des particules filtrables a débuté par le traitement des rinçages effectués sur la moitié avant du porte-filtre primaire à l'eau et à l'acétone, en l'occurrence le contenant (01) et (02). L'acétone a été laissée s'évaporer entièrement à température ambiante sous la hotte, puis le contenu aqueux restant a été mis dans une étuve à 105 °C pour séchage. Les résidus ont ensuite été placés dans un dessiccateur durant 24 heures, avant d'être pesés à intervalles de six heures jusqu'à l'obtention d'un écart inférieur à 0,5mg entre deux pesées consécutives. Le filtre primaire (contenant 03) a été transféré de la boîte de Petri à une nacelle de pesée, puis il a été conditionné dans un dessiccateur pendant 24 heures avant la pesée finale, réalisée avec une précision de 0,1mg.



Figure 5 — Étapes d'analyse des échantillons

L'analyse des matières particulaires condensables (MPC) a concerné d'abord les extraits aqueux issus du rinçage de la moitié arrière du porte-filtre primaire, à savoir, le contenant (04). Le filtre de brouillard a été soumis à trois extractions successives dans un bain sonore, et les extraits obtenus ont été combinés au contenu du contenant 04. Ensuite, une extraction organique a été effectuée avec du dichlorométhane (contenants 05), selon le même principe : trois extractions par bain sonore ont permis de récupérer les MPC solubles dans le DCM. Les phases aqueuse et organique ont été ensuite séparées dans une ampoule à décanter à l'aide de trois lavages successifs avec 30ml de DCM. La phase organique collectée dans le contenant (05) a été évaporée sous hotte à température ambiante, séchée 24 heures dans un dessiccateur, puis pesée jusqu'à stabilisation du poids (l'écart ne dépasse pas 0,5mg). De son côté, la phase aqueuse du contenant (04) a été partiellement évaporée à 105 °C en conservant environ 5 ml de liquide, puis séchée dans un dessiccateur pour une pesée finale.

Enfin, après une période suffisante d'élimination totale de l'humidité des sédiments à l'aide d'un dessiccateur, la pesée des contenants a été effectuée à l'aide d'une balance analytique à quatre décimales calibrées en juin 2025. Les résultats obtenus sont présentés dans la section suivante.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 Résultats d'analyse

Conformément au protocole de la méthode, les pesées consécutives ont été réalisées jusqu'à l'obtention d'un écart inférieur à 0,5mg (Fig. 6-A), le résultat a ensuite été noté dans la feuille de données analytique. Le tableau ci-après (Tab.6) présente le résultat de la masse de l'échantillon de particules en milligramme, obtenu avec les mesures gravimétriques consécutives pour les trois prélèvements avec une limite de détection gravimétrique de 0,42mg.

Tableau 6 — Résultats d'analyse en mg

Composant de la ligne	Résultats (mg)		
	Prélèvement 1	Prélèvement 2	Prélèvement 3
Lavage buse et partie avant du cyclone > PM _{2,5}	3,80	5,40	2,00
Lavage cyclone et sonde ≤ PM _{2,5}	12,90	11,20	11,80
Filtre primaire ≤ PM _{2,5}	0,00	0,00	0,00
Particules filtrables ≤ PM _{2,5} totales	12,90	11,20	11,80
Condensables inorganiques	8,04	19,54	9,06
Condensables organiques	1,40	1,80	1,20
Condensables totales	9,44	21,34	10,26
Matières particulaires 2,5 totales (Filtrables et condensables)	22,34	32,54	22,06

La concentration des matières particulaires totales, filtrables et condensables, dans les gaz de la cheminée a été calculée à l'aide de l'équation H-1 de la méthode de référence « SPE 1/RM/55 » suivante avec une incertitude étendue de 1,5mg à 95 % de confiance :

$$C_{MPT} = \frac{M_p}{V_c} \quad \text{Équation H-1}$$

Tel que :

- C_{MPT} : Concentration des matières particulaires totales des gaz de la cheminée dans les conditions de références de température et de pression (mg/m^3).
- M_p : Masse des matières particulaires totales recueillies au cours de l'analyse (mg).
- V_c : Volume du gaz prélevé dans les conditions de références de température et de pression (m^3).

Le volume de gaz échantillonné est obtenu à partir des feuilles de données de terrain ou par le fichier de calcul de la méthode, et ils sont de $1,664\text{m}^3$, $1,670\text{m}^3$ et $1,695\text{m}^3$ correspondant respectivement aux prélèvements 1,2 et 3.

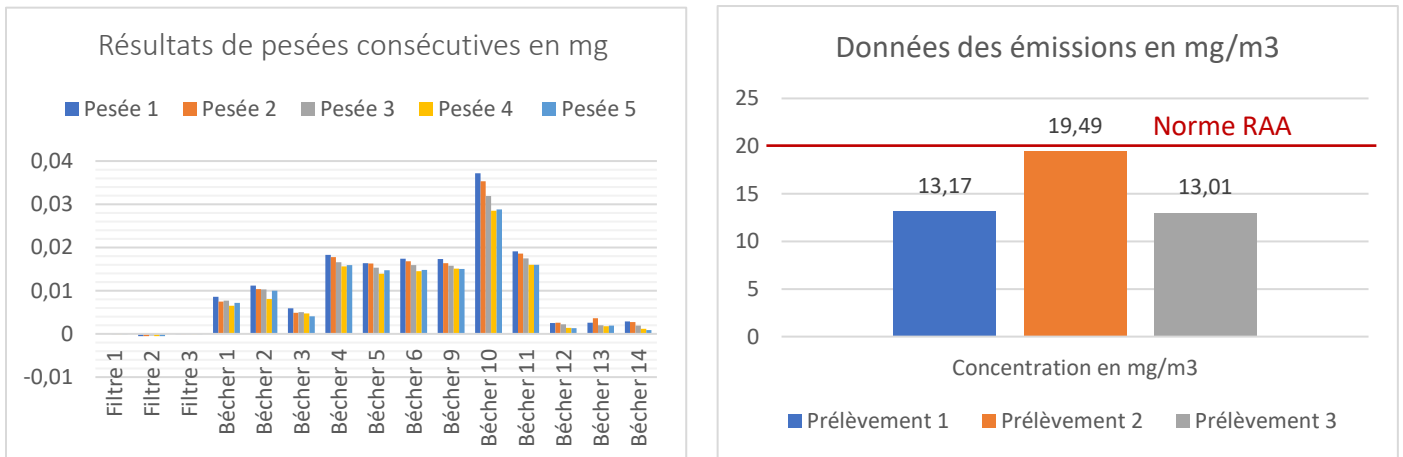


Figure 6 — A. Résultats de pesées consécutives des contenants ; B. Données d'émission de matières particulaires totales, filtrables et condensables.

Le résultat de calcul de la concentration de matières particulaires totales, filtrables et condensables qui correspond aux données d'émission de la cheminée est donné dans la figure précédente (Fig.6-B). Des pesées consécutives à des intervalles de temps réguliers de 24 heures ont été effectuées pour chacun des béchers

jusqu'à obtention d'une masse constante. La différence entre les deux pesées ne doit pas dépasser 0,5mg conformément à la méthode « SPE 1 RM 55 ».

4.2 Discussion

La masse finale des filtres primaires (1), (2) et (3) est identique à leur masse initiale et aucun changement d'état n'a été observé, ce qui confirme l'absence de dépôt particulaire et explique la valeur nulle obtenue lors des pesées successives (Fig. 6-A). Ce résultat s'explique par la rétention de la majorité des particules de diamètre inférieur ou égal à 2,5 μ m par le cyclone PM_{2,5} et par le fait que les particules de diamètre inférieur à la taille des pores des filtres (1,2 μ m selon le fabricant Fisher Scientific), ne peuvent être retenues.

Selon le tableau des résultats, la masse de la fraction condensable dans les trois prélèvements s'élève à 41,04mg, sachant que la masse totale des PM filtrables et condensables est de 76,94mg, nous pouvons déduire que la contribution de la fraction condensable compte pour 53,34 % des MP totales échantillonnées. La figure 7 suivante présente les proportions de données d'émissions des fractions filtrables et condensables durant les trois prélèvements.

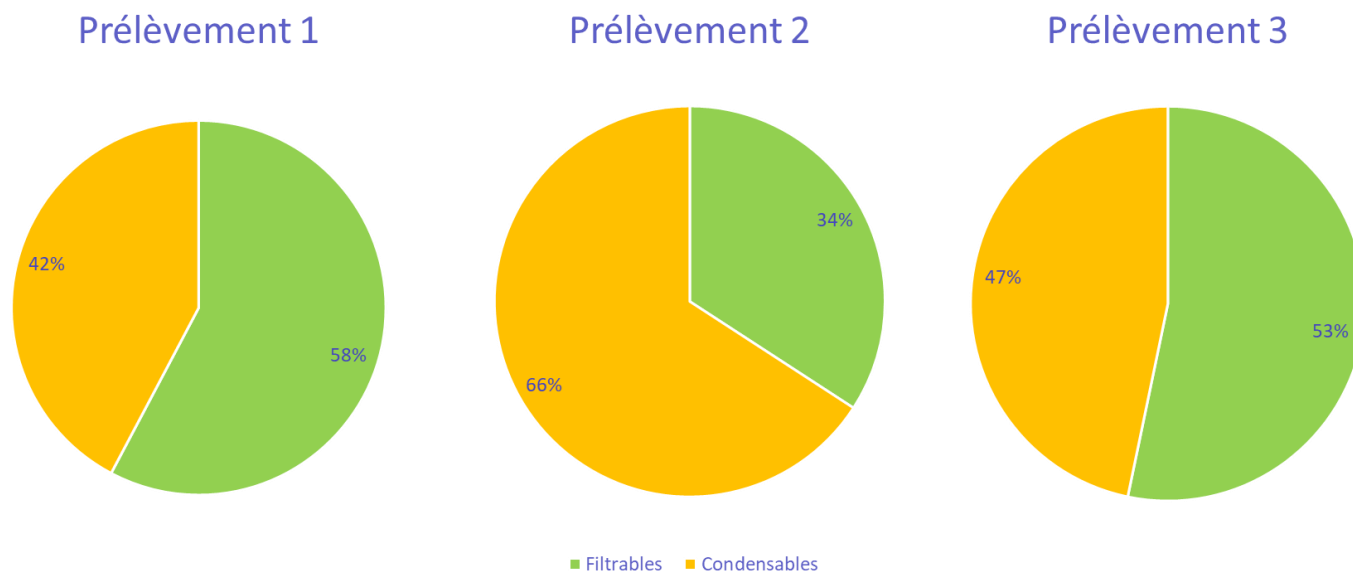


Figure 7 — Proportions des fractions filtrables et condensables.

Ces résultats sont réconfortés par l'étude de Yang et al, (2014) qui ont étudié les fractions filtrables et condensables issues de sources fixes, ils concluent que la contribution de la fraction condensable compte pour 52,8 % de la masse totale des PM_{2,5} pour les incinérateurs.

CHAPITRE 5

RÉALISATION DES OBJECTIFS ET RÉFLEXIONS CRITIQUES

5.1 Retour sur les objectifs de l'étude

Les objectifs de l'étude ont été atteints de manière intégrée en articulant développement méthodologique, quantification des émissions et analyse réglementaire. Un protocole de mesure optimisé a d'abord été établi à partir des exigences de la Méthode « I » de la SPE 1/RM/55, puis adapté aux spécificités technologiques et infrastructurelles du complexe de valorisation énergétique de la ville de Québec. L'échantillonnage conjoint des $PM_{2,5}$ filtrables et condensables, inspiré des protocoles de terrain combinant FPM et CPM dans les secteurs industriels, a permis de documenter la part des PM condensables, qui a atteint 53,34 % des émissions totales, seuil en accord avec les contributions majoritaires observées pour de nombreuses sources fixes où la CPM représente 50 à plus de 70 % du $PM_{2,5}$ totaux. Sur cette base, la performance métrologique du protocole a été évaluée suivant les référentiels ISO/CEI 17025 et ISO 17043 : précision, exactitude, répétabilité et robustesse ont été caractérisées par la mise en œuvre de séries, de contrôles qualité et, par analogie avec les approches de métrologie de l'air, par une démarche de validation structurée combinant développement de méthode et utilisation de matériaux de référence de pointe. Les résultats d'émission obtenus par la Méthode I (PM filtrables + condensables) ont ensuite été confrontés aux normes du Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère, montrant que les limites réglementaires, historiquement fondées sur la seule fraction filtrable, tendent à sous-représenter la charge réelle en $PM_{2,5}$ lorsque la CPM est dominante, comme déjà mis en évidence dans des inventaires où l'intégration de la CPM augmente significativement la contribution des sources stationnaires dans le $PM_{2,5}$ ambiant. Enfin, l'intégration explicite des PM condensables dans les calculs d'émissions annuelles a permis d'estimer l'impact sur les seuils de déclaration obligatoire : pour plusieurs catégories de sources, l'ajout de la CPM conduit à un dépassement des seuils ou à un reclassement des installations comme sources plus significatives de pollution particulaire, ce qui est cohérent avec les études montrant que la prise en compte de la CPM accroît les inventaires de PM et renforce le rôle des grandes combustions industrielles et des centrales dans la formation de $PM_{2,5}$ atmosphérique. Dans l'ensemble, l'étude démontre que l'adoption d'un protocole incluant systématiquement la fraction condensable est déterminante tant pour la représentativité environnementale des mesures que pour l'adéquation des cadres réglementaires et déclaratifs.

5.2 Réflexions critiques

Au-delà des cas d'installations non conformes à l'échantillonnage de tous les points de prélèvement exigés, l'un des enjeux majeurs réside dans le décalage persistant entre les exigences normatives et la réalité technologique et organisationnelle des sources industrielles, notamment au Québec et au Canada. Les contraintes d'accessibilité des cheminées, la variabilité des conditions de fonctionnement, la sous-estimation historique de la fraction condensable et le manque d'harmonisation entre les protocoles nord-américains et européens entraînent une grande hétérogénéité de la qualité des données et limitent la comparabilité spatio-temporelle des inventaires d'émissions. S'y ajoutent des tensions entre objectifs de conformité réglementaire et véritable démarche d'amélioration environnementale, qui peuvent conduire à une approche « minimaliste » de l'échantillonnage. À l'avenir, des perspectives innovantes reposent sur l'intégration de méthodes de mesure en continu pour les $PM_{2,5}$ (filtrables et condensables), le recours accru à la modélisation numérique couplée à des campagnes ciblées de mesure, ainsi que le développement de cadres réglementaires flexibles, mais robustes, capables d'intégrer rapidement de nouvelles connaissances scientifiques et des indicateurs de performance métrologique, l'incertitude, traçabilité et intercomparaisons. La coconstruction des protocoles entre autorités, industriels, laboratoires et chercheurs, de même que la transparence des données, plateformes ouvertes, audits indépendants, apparaissent également comme une condition centrale pour faire évoluer les pratiques vers un contrôle réellement préventif et fondé sur la science, plutôt que strictement déclaratif.

CONCLUSION

L'analyse de la place des particules condensables (CPM) dans la régulation québécoise des émissions particulaires met en évidence un décalage structurel entre l'état actuel des connaissances scientifiques et les cadres normatifs en vigueur. Alors que les politiques de réduction des PM se sont fortement intensifiées et que les technologies de contrôle des particules filtrables (FPM) ont permis d'abaisser leurs concentrations à des niveaux très faibles, les CPM représentent aujourd'hui une fraction souvent dominante du total des particules primaires émises par les grandes installations de combustion et les secteurs industriels lourds, pouvant atteindre 50 à plus de 80 % des émissions et multiplier par 2 à 7 les inventaires d'aérosols organiques lorsqu'elles sont correctement intégrées aux bilans d'émission (Feng et al., 2018).

Dans ce contexte, le fait que les CPM ne soient ni explicitement visées par les limites du RAA ni systématiquement incluses dans les seuils et obligations du Règlement sur la déclaration obligatoire de certaines émissions de contaminants se traduit par des inventaires incomplets, une sous-estimation du rôle réel des sources stationnaires dans la charge en $PM_{2,5}$ ambiante et, ultimement, par un risque de sous-appréciation des impacts sanitaires et environnementaux. Les travaux internationaux récents montrent pourtant que l'intégration explicite des CPM dans les inventaires améliore significativement la performance des modèles de qualité de l'air et révèle une contribution substantielle des CPM aux concentrations de $PM_{2,5}$ et d'aérosols organiques, en particulier lors des épisodes de pollution (Tong et al., 2024). Parallèlement, les progrès méthodologiques, qu'il s'agisse de protocoles combinés entre FPM et CPM, de systèmes de dilution innovants ou de dispositifs de mesure en ligne, ouvrent désormais la voie à une harmonisation des pratiques de mesure et à un encadrement réglementaire plus complet des particules primaires (Wang et al., 2020; Le et al., 2025). Dans ce cadre, l'étude souligne que l'absence de normalisation pleine et entière des CPM constitue un verrou scientifique, technique et réglementaire qui fragilise l'efficacité des politiques de gestion de la qualité de l'air. Elle plaide en conséquence pour une réforme graduelle, mais structurante des cadres québécois, fondée sur l'adoption de méthodes intégrées, sur la révision des seuils de conformité et de déclaration afin d'y inclure systématiquement la fraction condensable, et sur le renforcement des capacités métrologiques des laboratoires. Une telle évolution apparaît nécessaire pour aligner la réglementation provinciale sur l'état de l'art international, pour garantir la représentativité des inventaires d'émission et, en définitive, pour soutenir des stratégies de réduction des PM réellement cohérentes avec l'ampleur des enjeux sanitaires et climatiques associés aux particules fines.

RÉFÉRENCES

- Bari, Md. Aynul et Kindziarski, Warren B. (2016). Fine particulate matter (PM_{2,5}) in Edmonton, Canada: Source apportionment and potential risk for human health. *Environmental Pollution*, 218, 219–229. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.075>
- Bian, J., Zhao, H., Wang, B., Han, B., Ling, H., & Ju, F. (2023). Emission characteristics of condensable particulate matter (CPM) from FCC flue gas. *The Science of the Total Environment*, 163533. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163533>
- Cano, M., Reina, T., Portillo, E., Fernández, L., & Navarrete, B. (2021). Characterization of emissions of condensable particulate matter under real operation conditions in cement clinker kilns using complementary experimental techniques. *The Science of the Total Environment*, 786, 147472. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147472>
- Cano, M., Vega, F., Palomo, D., Serrano, J., & Navarrete, B. (2019). Characterization of Condensable Particulate Matter Emissions in Agricultural Diesel Engines Using a Dilution-Based Sampling Train. *Energy & Fuels*, 33(1), 577–587. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b03480>
- Choi, S. H., Choi, Y. H., Park, S. J., et al. (2021). Source apportionment and transboundary impacts of PM_{2,5} in major cities in East Asia: A combined modeling and receptor-based approach. *Science of the Total Environment*, 751, 141–171. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141710>,
- Conseil canadien des ministres de l'Environnement. (2025). Canadian Ambient Air Quality Standards Handbook / normes canadiennes de qualité de l'air ambiant — Manuel. <https://ccme.ca/en/canadian-ambient-air-quality-standards-handbook>
- Corio, L. A. et Sherwell, J. (2000). In-stack condensable particulate matter measurements and issues. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 50(2), 207–218. <https://doi.org/10.1080/10473289.2000.10464002>
- Environnement Canada (Environnement et changement climatique Canada). (2013). Méthode de référence : Mesure des émissions de matières particulaires fines à partir de sources fixes (Rapport SPE 1/RM/55, série de la protection de l'environnement). <https://publications.gc.ca/site/fra/9.912319/publication.html>
- Environnement et changement climatique Canada (ECCC). (2023). Programme de surveillance nationale de la pollution atmosphérique (SNPA)/National Air Pollution Surveillance (NAPS) Program [Ensemble de données]. Portail du gouvernement ouvert Canada. <https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/1b36a356-defd-4813-acea-47bc3abd859b>
- Fakhri, N., Stevens, R., Downey, A., Oikonomou, K., Sciare, J., Afif, C., & Hayes, P. L. (2024). Source apportionment of PM_{2,5} in Montréal, Canada, and health risk assessment for potentially toxic elements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24(2), 1193–1212. <https://doi.org/10.5194/acp-24-1193-2024>
- Feng, Y., Li, Y., et Cui, L. (2018). Critical review of condensable particulate matter. *Fuel*, 223, 131–141. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.03.118>,

Gouvernement du Québec. (2014). Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère (chapitre Q-2, r. 4.1). Éditeur officiel du Québec. <https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/document/rc/q-2,%20r.%204.1>

Gouvernement du Québec. (2022). Règlement sur la déclaration obligatoire de certaines émissions de contaminants dans l'atmosphère (chapitre Q-2, r. 15). Éditeur officiel du Québec. <https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/document/rc/q-2,%20r.%2015>

Hao, H., Wang, K., Wu, G., Liu, J., et Li, J. (2024). PM_{2,5} concentrations based on near-surface visibility in the Northern Hemisphere from 1959 to 2022. *Earth System Science Data*, 16(9), 4051–4076. <https://doi.org/10.5194/essd-16-4051-2024>

Le, Y., Kim, D., Kang, C., Bae, G., Park, P., Jung, Y., Jang, K., Kang, D., Youn, J., & Jeon, K. (2025). Rethinking primary particulate matter: Integrating filterable and condensable particulate matter in measurement and analysis. *The Science of the Total Environment*, 961, 178396. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178396>

Li, M., Liu, H., Geng, G., Hong, C., Liu, Y., Tong, D., Zheng, B., Wiedmann, T., & Zhang, Q. (2022). Impacts of condensable particulate matter on atmospheric organic aerosols and fine particulate matter (PM_{2.5}) in China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(18), 11845–11866. <https://acp.copernicus.org/articles/22/11845/2022/>

Liu, W., Wang, X., Zhao, B., & Lu, J. (2023). New insights into the synergistic effect on condensable particulate matter based on the formation, characteristics and removal. *Aerosol and Air Quality Research*, 23(6), 230145. <https://doi.org/10.4209/aaqr.230145>

Liu, Y., Wang, L., Yang, L., & Li, Y. (2025). Online measurement method for condensable particulate matter based on an innovative dilution cooling chamber. *Energies*, 18(3), 717. <https://doi.org/10.3390/en18030717>

Masselot, P., Chebana, F., Lavigne, É., Campagna, C., Gosselin, P., & Ouarda, T. B. M. J. (2019). Toward an Improved Air Pollution Warning System in Quebec. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(12), 2095. <https://doi.org/10.3390/ijerph16122095>

Morino, Y., Kajii, Y., Tanimoto, H., et al. (2018). Seasonal variation of PM_{2,5} in East Asia: Source apportionment and long-range transport. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(14), 7711–7727. <https://doi.org/10.1029/2018JD028678>

Riffault, V., Arndt, J., Marris, H., Mbengue, S., Setyan, A., Alleman, L. Y., Deboudt, K., Flament, P., Augustin, P., Fast, J. D., Namwoyn, A., & Bonnaire, N. (2015). Chemically resolved particulate matter emissions from the burning of biomass: Volatility and solid residue fraction. *Atmospheric Environment*, 115, 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.05.036>

Roper, C., Delgado, L. S., Santiago Delgado, L., Tanguay, R. L., et Simonich Massey, S. L. (2018). PM_{2,5} filter extraction methods: Implications for chemical and toxicological analyses. *Environmental Science & Technology*, 52(23), 13359–13 368. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b04308>

- Sommerfeld, M., et Taborda, M. A. (2024). Understanding solid particle transport in a gas cyclone separator. *International Journal of Multiphase Flow*, 104992. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2024.104992>
- Tong, H., Wang, Y., Huang, L., Su, Q., Yi, X., Zhai, H., Jiang, S., Liu, H., Liao, J., & Li, L. (2024). Study of condensable particulate matter from stationary combustion sources: Source profiles, emissions, and impact on ambient fine particulate matter. *The Science of the Total Environment*, 176222. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176222>
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2014). Method 201A—Determination of PM₁₀ and PM_{2.5} emissions from stationary sources (constant sampling rate procedure). 40 CFR Part 51, Appendix M. https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-08/documents/method_201a_0.pdf
- Wang, G., Deng, J., Zhang, Y., Li, Y., Lu, Z., Hao, J., & Jiang, J. (2020). Evaluating airborne condensable particulate matter measurement methods in typical stationary sources in China. *Environmental Science & Technology*, 54(11), 7053–7062. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b05282>
- Wang, K., Gao, J., Liu, K., Tong, Y., Dan, M., Zhang, X., et Liu, C. (2022). Unit-based emissions and environmental impacts of industrial condensable particulate matter in China in 2020. *Chemosphere*, 306, 134759. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4035367>
- Wang, L., Li, Y., Li, J., Zhang, H., Zhang, Z., & Ran, W. (2022). The state of the art of condensable particulate matter. *Fuel*, 321,124 807. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124807>
- Wu, Y., Xu, Z., Liu, S., Tang, M., & Lu, S. (2021). Emission characteristics of PM_{2.5} and components of condensable particulate matter from coal-fired industrial plants. *The Science of the Total Environment*, 796, 148782. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148782>
- Yang, H.-H., Lee, K.-T., Hsieh, Y.-S., Luo, S.-W., & Li, M.-S. (2014 b). Filterable and condensable fine particulate emissions from stationary sources. *Aerosol and Air Quality Research*, 14(7), 2010–2016. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2014.08.0178>
- Zheng, C., Hong, Y., Liu, S., Yang, Z., Chang, Q., Zhang, Y., & Gao, X. (2018). Removal and emission characteristics of condensable particulate matter in an ultralow emission power plant. *Energy & Fuels*, 32(10), 10732–10 742. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b02464>