

**MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT
ET DE LA LUTTE CONTRE
LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES**

Variations spatiotemporelles et saisonnalité des concentrations de particules fines à Québec

2010-2018

Coordination et rédaction

Cette publication a été réalisée par la Direction générale du suivi de l'état de l'environnement du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). Elle a été produite par la Direction des communications du MELCC.

Renseignements

Pour tout renseignement, vous pouvez communiquer avec le Centre d'information.

Téléphone : 418 521-3830
1 800 561-1616 (sans frais)

Télécopieur : 418 646-5974

Formulaire : www.environnement.gouv.qc.ca/formulaires/renseignements.asp

Internet : www.environnement.gouv.qc.ca

Pour obtenir un exemplaire du document :

Direction générale du suivi de l'état de l'environnement
Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre
les changements climatiques

675, boul. René-Lévesque Est, 7^e étage, boîte 22
Québec (Québec) G1R 5V7
Téléphone : 418 521-3820

Ou

Visitez notre site Web : www.environnement.gouv.qc.ca

Référence à citer

BUSQUE, D. (2022). *Variations spatiotemporelles et saisonnalité des concentrations de particules fines à Québec : 2010-2018*. Québec, ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction générale du suivi de l'état de l'environnement, 49 p. + 5 annexes, [En ligne].

Tous droits réservés pour tous les pays.

© Gouvernement du Québec - 2022

Équipe de réalisation

Rédaction	Daniel Busque ¹ , biologiste, M. Sc.
Révision scientifique	Marie-Pier Brault ¹ , biologiste M.E.I. Jean-François Brière ¹ , physicien Antony Laberge ¹ , chimiste, M. Sc., MBA Marc-André Foucreault ¹ , B. Sc. biochimie Catherine Savard ¹ , physicienne, M. Sc. Manon Therrien ¹ , chimiste, M. Sc.
Acquisition, traitement et validation de données	Isabelle Masse ¹ Annie-Claude Paradis ¹
Exploitation et entretien de la station de mesure et d'échantillonnage	Mathieu Beaupré ² , M. Sc., ing. Frédéric Bouchard ² Martin Bouchard ² Sylvain Couture ² Maxime Daigle ² Philippe Desarzens ² Jean-Pierre Duchesne ² Robert Dumont ² Vincent Giasson ² Michel Huot ² Patrice Lambert ² Luc Lavoie ² Martin Michaud ² Benoît Parent ² Patrick Pouliot ² Christian Roy ²

-
1. Direction de la qualité de l'air et du climat (MELCC).
 2. Direction de l'acquisition de données et des opérations (MELCC).

RÉSUMÉ

Ce rapport décrit les variations spatiales et temporelles des concentrations de $PM_{2.5}$ à Québec, pour la période de 2010 à 2018. La comparaison des données annuelles et saisonnières des trois stations urbaines à l'étude démontre bien la présence de cette variabilité.

Plusieurs constats découlent de ces analyses. La station Québec – Vieux-Limoilou (VLI) est celle qui, en général, présente les valeurs médianes les plus élevées. C'est en été que la situation est la plus marquée, alors que les médianes des deux autres stations se rapprochent du niveau de fond régional, mais que celle de la station VLI demeure plus élevée. De plus, elle est la seule qui ne présente pas de différence significative entre les périodes de semaine et de fin de semaine en été. Cette situation suggère que la station VLI serait sous l'influence d'un plus grand nombre de sources d'émission de particules fines ($PM_{2.5}$) que les autres stations.

Les données de la station Québec – École Les Primevères (EPV) montrent elles aussi une particularité qui la distingue des autres stations. Bien que ce soit la station qui se rapproche le plus du niveau de fond régional de la station Deschambault, les soirées d'hiver présentent un scénario totalement différent. À cette période de l'année, les concentrations de $PM_{2.5}$ augmentent rapidement en début de soirée pour atteindre des sommets en fin de soirée. À son maximum, le 98^e centile de la station EPV est supérieur de $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ par rapport aux autres stations urbaines. Le chauffage au bois résidentiel est le principal responsable de cette situation. Les analyses de carbone noir laissent voir que la hausse matinale en hiver et celle qui est observée en soirée en été seraient aussi reliées au chauffage au bois.

Les données de la station Québec – Collège Saint-Charles-Garnier (SCG) se trouvent dans une situation mitoyenne par rapport aux stations EPV et VLI. En été, les concentrations de $PM_{2.5}$ mesurées sont plus proches de celles de la station EPV, mais avec une hausse matinale plus marquée due aux émissions provenant de la combustion de carburant fossile. En hiver, ses concentrations sont plus proches de celles de la station VLI.

L'ensemble des analyses effectuées permet de constater que les médianes des concentrations de $PM_{2.5}$ observées aux trois stations urbaines de Québec, plus particulièrement les stations EPV et SCG, peuvent être très proches de celles du niveau de fond régional. L'apport saisonnier des sources locales ne dépasse pas $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, au niveau de la médiane, peu importe la saison. L'influence des sources locales se manifeste quand les conditions climatiques ne favorisent pas une bonne dispersion des contaminants, comme en hiver où, à la station EPV, l'apport local grimpe jusqu'à $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ au 98^e centile.

Au niveau des tendances, une variation spatiale est aussi présente. Pour la période à l'étude, les concentrations de $PM_{2.5}$ (médiane et 98^e centile) des stations VLI et SCG ont une tendance significative à la baisse. De leur côté, les valeurs médianes de la station EPV montrent une tendance significative à la hausse, alors que celles du 98^e centile sont stables.

L'influence du vent démontre que l'apport local aux stations urbaines a un effet primordial sur les concentrations de $PM_{2.5}$, particulièrement en hiver, où les vents calmes contribuent aux valeurs les plus élevées. De plus, les données de la station VLI se démarquent par une influence des vents du nord-est puisque les concentrations ne diminuent pas avec l'augmentation de la vitesse du vent. Elles demeurent relativement constantes jusqu'à des vents soufflant à plus de 40 km/h en provenance du nord-est.

Les analyses de ce rapport démontrent bien la variabilité spatiotemporelle des concentrations de $PM_{2.5}$ entre les trois stations urbaines de Québec. Toutefois, des connaissances supplémentaires seraient nécessaires pour préciser les facteurs les influençant. Parmi celles-ci, une meilleure connaissance de la composition des particules fines et une analyse des précurseurs des $PM_{2.5}$ d'origine secondaire et de l'effet des conditions climatiques en lien avec la topographie permettraient de mieux comprendre la dynamique des $PM_{2.5}$ à Québec.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	iv
Table des matières	v
Liste des tableaux	vi
Liste des figures	vii
Liste des abréviations, des sigles et des définitions	viii
1. Introduction	1
2. Contexte et méthodologie	2
2.1 Description de la zone d'étude	2
2.2 Suivi de la qualité de l'air	3
2.3 Données et méthodes d'analyse	4
2.3.1 Coefficient de détermination et de divergence	5
2.3.2 Diagrammes en boîte	5
2.3.3 Test de Wilcoxon	6
2.3.4 Tendances	6
2.3.5 Direction et vitesse du vent.....	6
3. Résultats et discussion	7
3.1 Corrélation et coefficient de divergence	7
3.2 Variations des concentrations de particules fines	11
3.2.1 Variations annuelles	11
3.2.2 Variations saisonnières.....	11
3.2.3 Variations horaires saisonnières	13
3.2.4 Variations quotidiennes saisonnières	17
3.2.5 Estimation de l'apport local saisonnier	22
3.3 Tendances	23
3.4 Direction et vitesse du vent.....	24
4. Conclusion	28
Références bibliographiques.....	29
Annexes.....	32

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Stations de surveillance de la qualité de l'air à l'étude.....	3
Tableau 2	Coefficient de divergence entre les concentrations quotidiennes moyennes de particules fines des quatre stations de la région de Québec pour la période de 2010 à 2018.....	10
Tableau 3	Coefficient de divergence saisonnier entre les concentrations quotidiennes moyennes de particules fines des quatre stations de la région de Québec pour la période de 2010 à 2018.....	10
Tableau 4	Écart entre le 98 ^e centile et la médiane des concentrations saisonnières de particules fines ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour la période de 2010 à 2018.	12
Tableau 5	Écarts entre les valeurs hivernales et estivales ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) des rangs centiles des concentrations de particules fines pour la période de 2010 à 2018.....	13
Tableau 6	Écarts maximaux ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) entre le 98 ^e centile et la médiane des concentrations horaires de particules fines pour la période de 2010 à 2018, par saison.....	15
Tableau 7	Écarts saisonniers entre les concentrations de particules fines des stations urbaines de la ville de Québec et celles de la station témoin, pour la période de 2010 à 2018.....	22

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Carte de l'emplacement des stations de surveillance de la qualité de l'air dans la région de Québec	2
Figure 2	Roses des vents de la station météorologique Québec/Jean Lesage Intl, pour la période de 2013 à 2018.....	3
Figure 3	Densité de population, selon les secteurs de recensement de 2016, de la ville de Québec.	4
Figure 4	Description d'une boîte à moustaches	5
Figure 5	Corrélations annuelles et saisonnières entre les concentrations quotidiennes moyennes de particules fines des quatre stations de la région de Québec pour la période de 2010 à 2018.....	8
Figure 6	Concentrations de particules fines des quatre stations de la région de Québec pour la période de 2010 à 2018.....	11
Figure 7	Concentrations saisonnières des particules fines des quatre stations de la région de Québec pour la période de 2010 à 2018.....	12
Figure 8	Concentrations médianes saisonnières des particules fines en fonction de l'heure de quatre stations de la région de Québec pour la période de 2010 à 2018.	14
Figure 9	Concentrations moyennes horaires saisonnières de carbone noir selon leur source aux stations EPV et SCG pour la période de décembre 2018 à novembre 2019.....	16
Figure 10	Concentrations médianes quotidiennes saisonnières des particules fines des quatre stations de la région de Québec pour la période de 2010 à 2018.....	18
Figure 11	Concentrations médianes horaires quotidiennes par saison des médianes de particules fines des quatre stations de la région de Québec, pour la période de 2010 à 2018.....	20
Figure 12	Concentrations médianes saisonnières des particules fines, en fonction de l'heure et du moment de la semaine, des quatre stations de la région de Québec pour la période de 2010 à 2018.....	21
Figure 13	Tendances désaisonnalisées des concentrations médianes mensuelles de particules fines aux stations de la région de Québec, pour la période de 2010 à 2018.....	23
Figure 14	Tendances désaisonnalisées des 98 ^{es} centiles horaires mensuels des particules fines aux stations de la région de Québec, pour la période de 2010 à 2018.....	24
Figure 15	Concentrations médianes saisonnières des particules fines en fonction de la direction et de la vitesse du vent de quatre stations de la région de Québec, pour la période de 2013 à 2018.....	25
Figure 16	Concentrations saisonnières des 98 ^{es} centiles des particules fines en fonction de la direction et de la vitesse du vent de quatre stations de la région de Québec, pour la période de 2013 à 2018.....	27

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES DÉFINITIONS

cm	centimètre
COD	coefficient de divergence
DEC	station Deschambault (03200)
EPV	station Québec – École Les Primevères (03021)
km/h	kilomètre par heure
MELCC	ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
NaCl	chlorure de sodium
NH₄⁺	ammonium
NO₃⁻	nitrate
µg/m³	microgramme par mètre cube
µm	micromètre
mm	millimètre
PM_{2,5}	particules ayant un diamètre égal ou inférieur à 2,5 µm, communément appelées particules fines
RSQAQ	Réseau de surveillance de la qualité de l'air du Québec
SCG	station Québec – Saint-Charles-Garnier (03028)
SO₄²⁻	Sulfates
VLI	station Québec – Vieux-Limoilou (03006)

1. INTRODUCTION

Les particules fines (PM_{2,5}) sont des aérosols en suspension sous forme solide ou liquide ayant un diamètre aérodynamique égal ou inférieur à 2,5 µm. De nombreux facteurs influencent leur composition, notamment leur provenance, la saison et les conditions atmosphériques. Les particules fines sont composées, entre autres, de sulfates (SO₄²⁻), de nitrate (NO₃), d'ammonium (NH₄⁺), de chlorure de sodium (NaCl), de carbone (élémentaire et organique), de matières minérales et d'eau. De plus, elles peuvent être le résultat de réactions chimiques et physiques dans l'atmosphère impliquant des éléments précurseurs, comme les oxydes de soufre et d'azote, les composés organiques volatils, l'ammoniac et la vapeur d'eau. Les PM_{2,5} sont émises principalement par le chauffage au bois (43,8 %), les industries (39,1 %) et le transport (16,0 %) (MDDEP, 2011).

L'intérêt porté aux PM_{2,5} provient de leurs effets sur la santé humaine. Leur petite taille fait en sorte qu'elles peuvent pénétrer profondément dans le système respiratoire et interagir avec le corps humain. Elles ont la particularité de n'avoir aucune concentration sans effet sur la santé (INSPQ, 2012; WHO, 2006), ce qui signifie que tout ajout dans l'air augmente le risque d'apparition d'effets sur la santé des populations exposées. Ces effets, qui touchent les systèmes respiratoire et cardiovasculaire, peuvent mener à une hausse de la mortalité et de la morbidité quotidienne (WHO, 2013). Les personnes souffrant de maladie respiratoire ou cardiaque ainsi que les personnes âgées et les enfants sont les plus vulnérables à ces effets.

Au Québec, les PM_{2,5} sont l'un des principaux constituants du smog. Elles sont la première cause des journées de mauvaise qualité de l'air, telle qu'elles sont définies par le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC, 2020a), depuis qu'elles sont mesurées de façon continue par le Réseau de surveillance de la qualité de l'air du Québec (RSQAQ) en 1998.

En milieu urbain, la présence de plusieurs sources d'émission locales de PM_{2,5} peut grandement influencer leurs concentrations. À Québec, cette situation a déjà été abordée dans quelques rapports sur la qualité de l'air (Bisson et Busque, 2010; Direction de santé publique, 2018; Foucreault, 2016; Walsh et Brière, 2018). Toutefois, aucun portrait détaillé de la variabilité spatiotemporelle des concentrations de PM_{2,5} n'a été réalisé dans ces études. Cet aspect est d'une grande importance pour évaluer adéquatement les niveaux d'exposition d'une population à un contaminant (Pinto et al., 2004). De plus, cette analyse peut renseigner sur les facteurs à l'origine de ces variations.

Ainsi, ce rapport décrit les variations spatiales et temporelles des concentrations de PM_{2,5} à Québec, afin d'offrir un premier portrait détaillé de ce contaminant d'intérêt. Puisque ces variations de concentrations sont susceptibles de présenter des fluctuations au cours d'un cycle annuel en raison des conditions climatiques, les analyses seront aussi effectuées en tenant compte des saisons. Pour évaluer et comprendre la dynamique de ce contaminant, les analyses suivantes ont été effectuées : corrélation et coefficient de divergence, patrons temporels, tendances et influence de la direction et de la vitesse du vent. Les données de trois stations de la ville de Québec seront comparées entre elles, ainsi qu'à celles d'une station témoin, sur la période de 2010 à 2018.

2. CONTEXTE ET MÉTHODOLOGIE

2.1 Description de la zone d'étude

La ville de Québec est située au cœur de la région administrative de la Capitale-Nationale. D'après le recensement de 2016, elle compte 531 902 habitants et sa région métropolitaine de recensement en regroupe 800 296 (Statistique Canada, 2017). Elle est située principalement dans les basses terres du Saint-Laurent, sur la rive nord du Saint-Laurent (figure 1). Ce dernier borde la ville dans un axe sud-ouest-nord-est. Le relief de Québec est le résultat de la jonction de trois grands ensembles géologiques. Sa partie nord se caractérise par la présence de montagnes appartenant au Bouclier canadien. Au sud, les Appalaches font une incursion avec la colline de Québec, entre les embouchures des rivières du Cap-Rouge et Saint-Charles. Au centre, la Plate-forme du Saint-Laurent présente un relief plat qui se caractérise par la présence d'une dépression géographique, délimitée au sud par la colline de Québec et un escarpement traversant la ville dans le même axe que la colline (encadré figure 1).

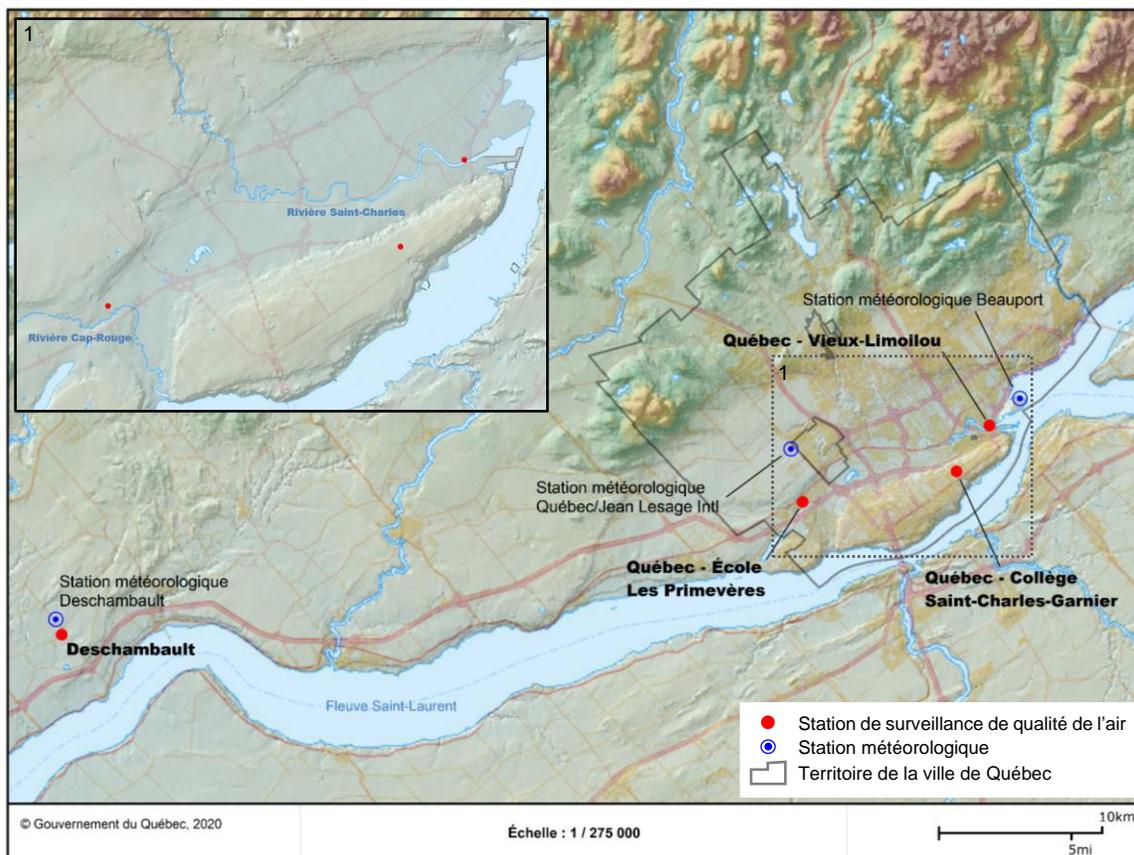


Figure 1 Carte de l'emplacement des stations de surveillance de la qualité de l'air dans la région de Québec

Québec étant situé en zone tempérée, son climat présente quatre saisons bien définies. Selon les normales climatiques de 1981 à 2010 de la station météorologique de l'aéroport international de Québec (ECCC, 2020a), l'écart de température entre le mois le plus chaud (juillet) et le mois le plus froid (janvier) est de 32 °C. Les précipitations moyennes annuelles sont de 1189,7 mm, dont 899,3 mm tombent sous forme de pluie et 303,4 cm sous forme de neige. Les vents dominants soufflent de l'ouest-sud-ouest et de l'est-nord-est (figure 2) à la station météorologique Québec/Jean Lesage Intl (ECCC, 2020b; ID climatologique 701S001).

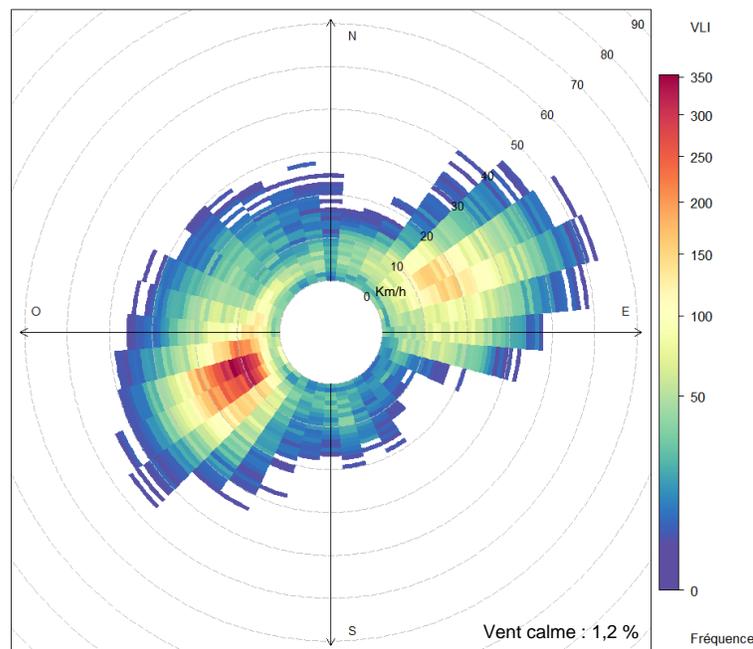


Figure 2 Rose des vents de la station météorologique Québec/Jean Lesage Intl pour la période de 2013 à 2018

L'économie de Québec dominée par le secteur tertiaire est composée d'entreprises de services (administratif, financier, académique, etc.). Peu d'entreprises du secteur industriel sont présentes sur son territoire. Toutefois, elles ont la particularité d'être principalement regroupées en bordure du fleuve, à l'embouchure de la rivière Saint-Charles.

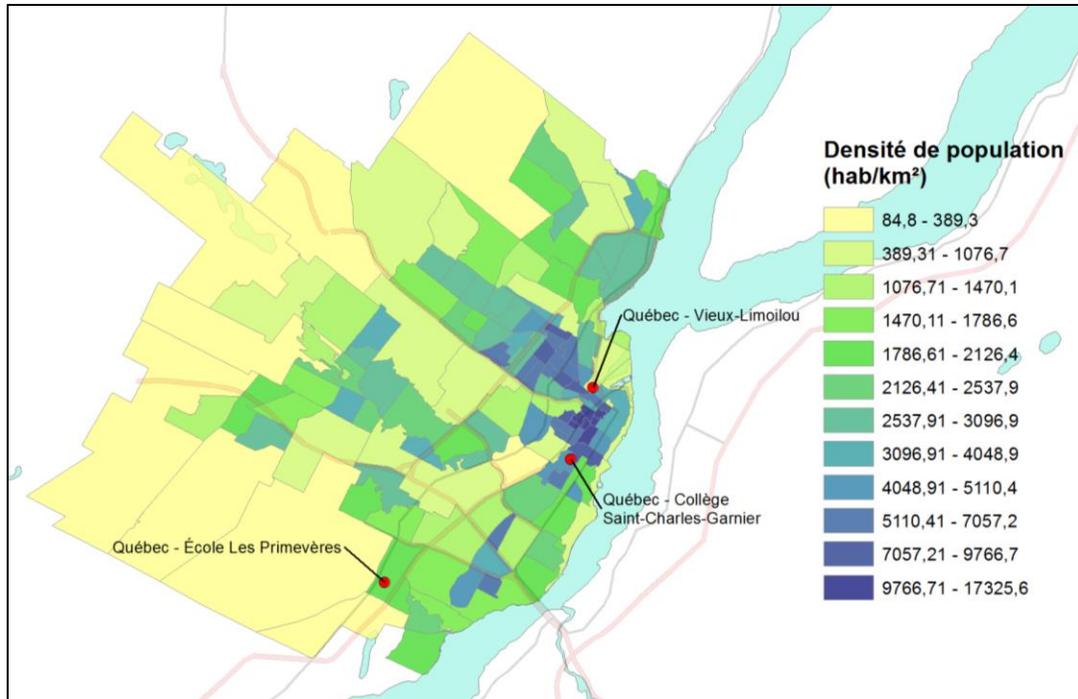
2.2 Suivi de la qualité de l'air

Pour la période de 2010 à 2018, le RSQAQ comptait trois stations permanentes de suivi des $PM_{2,5}$ en continu à Québec (tableau 1). Les données de $PM_{2,5}$ de ces stations font l'objet des analyses de ce document. La station Deschambault, située à 30 km au sud-ouest de Québec, est incluse à titre de station témoin, comme niveau de fond régional.

La station Québec – Vieux-Limoilou (03006) est située en plein cœur de la ville, dans la zone la plus densément peuplée (figure 3) et la plus fréquentée, où les secteurs résidentiel, commercial et industriel se côtoient. Une zone industrialo-portuaire et une autoroute se trouvent au nord-est de la station et un incinérateur municipal à ordures ménagères est situé au nord. La station Québec – École Les Primevères (03021) est située à l'extrémité sud-ouest de la ville, dans un secteur résidentiel. La station Québec – Collège Saint-Charles-Garnier (03028) est située dans un quartier résidentiel de la haute-ville à proximité de la zone la plus densément peuplée.

Tableau 1 Stations de surveillance de la qualité de l'air à l'étude

Nom des stations	Acronyme	Coordonnées géographiques	Altitude (m)	Type de milieu
Québec – Vieux-Limoilou	VLI	46,821180 / -71,220489	7	Urbain
Québec – École Les Primevères	EPV	46,774187 / -71,369694	25	Urbain
Québec – Collège Saint-Charles-Garnier	SCG	46,794902 / -71,246363	74	Urbain
Deschambault	DEC	46,682379 / -71,965892	49	Rural



Source : Fichiers des limites des secteurs de recensement du Recensement de 2016, produit n° 92-168-X au catalogue de Statistique Canada.

Figure 3 Densité de population, selon les secteurs de recensement de 2016, de la ville de Québec

Afin d'alléger le texte et les figures, un acronyme pour chaque station (tableau 1) sera utilisé pour les désigner dans les sections suivantes.

La période couverte par ce rapport est de 2010 à 2018. Les données horaires proviennent toutes d'appareils Met One BAM 1020 (Met One Instrument, 2020). Il est à noter que les données du 29 et du 30 mai 2010 de ces quatre stations ont été délibérément omises en raison de leur caractère exceptionnel, afin de simplifier la présentation graphique des données. Ces données correspondent aux deux jours où les stations ont été touchées par le panache de fumée provenant d'un incendie de forêt en Haute-Mauricie (MELCC, 2020b). Les concentrations horaires ont atteint des valeurs de plus de 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

2.3 Données et méthodes d'analyse

Les données horaires de $\text{PM}_{2,5}$ utilisées dans ce rapport proviennent toutes de la base de données de la qualité de l'air ambiant du Ministère (MELCC, 2020c). Un portrait détaillé des statistiques descriptives des données analysées est disponible à l'annexe A. Les données seront comparées sur une base annuelle et saisonnière. Le printemps regroupe les mois de mars, avril et mai, l'été les mois de juin, juillet et août, l'automne les mois de septembre, octobre et novembre et l'hiver les mois consécutifs de décembre, janvier et février. Toutes les analyses ont été réalisées à l'aide de différents progiciels du logiciel R (R CORE TEAM, 2019).

Puisque les distributions de données de toutes les stations ne respectent pas la loi de la normalité (test de Kolmogorov-Smirnov $p < 0,005$), les comparaisons entre elles seront faites sur la base des rangs centiles, sauf où cela est indiqué, de manière à éviter l'influence des valeurs extrêmes sur les moyennes. Ainsi, pour comparer les concentrations de $\text{PM}_{2,5}$, les valeurs du 50^e (médiane) et du 98^e centile seront les principales valeurs analysées. La première servira à comparer les tendances centrales des données, alors que le 98^e centile permettra la comparaison des valeurs élevées.

2.3.1 Coefficient de détermination et de divergence

Des analyses permettant d'évaluer la similitude du patron des variations temporelles entre deux stations ont été réalisées avec le progiciel Openair (Carslaw, 2019; Carslaw et Ropkins, 2012) à partir de moyennes quotidiennes. Pour chaque paire de valeurs, une régression linéaire est déterminée sous la forme de l'équation $y = mx + b$, où y est la valeur prédite, m la pente de la droite, x la valeur connue et b l'intercepte. Pour évaluer la qualité de la relation de la régression linéaire entre les variables, le coefficient de détermination R^2 est calculé. Sa valeur se situe entre 0 et 1, où 0 signifie que l'équation de la droite de régression détermine 0 % de la distribution des points et 1 signifie que l'équation de la droite de régression détermine 100 % de la distribution des points.

Afin de compléter l'analyse de régression qui ne permet pas de mesurer le niveau de similitude des données, de nombreuses études (Kim, Hopke et al., 2005; Krudysz, Moore et al., 2008; Pinto, Lefohn et al., 2004) suggèrent de calculer le coefficient de divergence (COD). Puisqu'il a été démontré qu'une forte corrélation entre les sites n'implique pas nécessairement une similitude entre les données (Kim, Hopke et al., 2005), le COD permet de venir préciser le degré de variabilité spatiale entre deux stations. Le COD se définit par l'équation suivante :

$$COD_{jk} = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \left[\frac{(x_{ij} - x_{ik})}{(x_{ij} + x_{ik})} \right]^2}$$

où x_{ij} et x_{ik} représentent les concentrations quotidiennes pour le jour i au site j et k , et où p est le nombre d'observations. Le COD produit une valeur entre 0 et 1, où 0 indique que les observations sont identiques et 1 n'indique aucune similitude. Le seuil typiquement utilisé pour déterminer la similarité est de 0,2 (Krudysz, Moore et al., 2008). Au-delà de ce seuil, les données sont considérées comme hétérogènes.

2.3.2 Diagrammes en boîte

Les diagrammes en boîte (*boxplot*) permettent de visualiser plusieurs paramètres d'une distribution de données, notamment la médiane, la moyenne, l'intervalle interquartile et les valeurs extrêmes (figure 4). Ils sont un moyen de comparer facilement la distribution de plusieurs jeux de données entre eux.

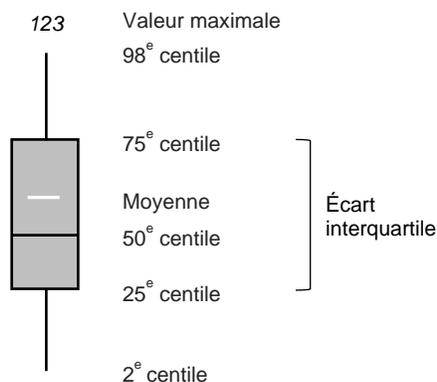


Figure 4 Description d'une boîte à moustaches

La tendance centrale des valeurs de chaque boîte est indiquée par la position de la médiane. La longueur de la boîte représente l'écart interquartile, soit l'écart entre le 25^e et le 75^e centile. La longueur des « moustaches » donne les valeurs des 2^e et 98^e centiles. La valeur maximale de la distribution de données est inscrite au sommet de la moustache supérieure.

Ces analyses ont été réalisées avec le progiciel ggplot2 (Wickham, 2016) du logiciel R (R Core Team, 2019).

2.3.3 Test de Wilcoxon

Le test statistique de Wilcoxon a été utilisé pour déterminer si les concentrations des contaminants sont différentes d'une station à l'autre. Il s'agit d'un test non paramétrique qui permet de tester l'hypothèse selon laquelle les médianes de deux groupes de données sont proches. Il permet de déterminer si ces dernières sont significativement différentes à un seuil alpha de 0,05 ($p < 0,05$). L'utilisation des médianes permet au test d'être robuste face à la présence potentielle de données extrêmes. Les tests ont été effectués avec le progiciel R Commander (Fox et Bouchet-Valat, 2019) du logiciel R (R Core Team, 2019).

2.3.4 Tendances

Les tendances ont été réalisées avec le progiciel Openair (Carslaw, 2019; Carslaw et Ropkins, 2012) du logiciel R en utilisant la méthode de Theil-Sen (Sen, 1968). Cette méthode non paramétrique basée sur la pente médiane est moins sensible aux valeurs aberrantes que les méthodes de régression traditionnelles, ce qui permet une évaluation plus fiable de la tendance (MELCC, 2020d). La méthode utilisée est la même que celle qui a été employée par Foucreault (2019) et Laberge (2020) pour des analyses de tendance similaires. Dans les figures, des symboles affichés à côté de chaque estimation de tendance indiquent le seuil de signification statistique, tel que : $p < 0,001 = ***$, $p < 0,01 = **$, $p < 0,05 = *$ et $p < 0,1 = +$.

2.3.5 Direction et vitesse du vent

L'influence de la direction et de la vitesse du vent est présentée sous forme de graphique polaire bivarié des concentrations médianes de $PM_{2,5}$. La particularité de ces graphiques est de montrer les variations des concentrations en fonction de la direction et de la vitesse des vents. La prise en compte de la vitesse du vent est un élément d'importance car, en plus d'être responsable de la dispersion atmosphérique des contaminants, elle peut aussi occasionner des hausses de concentrations dans des circonstances particulières (Carslaw et Ropkins, 2012). L'augmentation de la vitesse du vent peut provoquer de l'érosion éolienne et rabattre le panache d'une haute cheminée au sol. Ces graphiques sont produits avec le progiciel Openair du logiciel R.

Afin d'assurer une uniformité entre les stations et en raison de la disponibilité des données météorologiques, les données utilisées couvrent la période de 2013 à 2018. De plus, pour maximiser la représentativité de ces analyses, chaque station de surveillance de la qualité de l'air est associée à une station météorologique située à proximité. Les données météorologiques associées à la station SCG proviennent du même site et la station est exploitée par le Ministère (ID climatologique 7016971) (figure 1). Les données météorologiques des trois autres stations proviennent de stations exploitées par Environnement et Changement climatique Canada. Ainsi, la station VLI est associée à la station météorologique Beauport (ECCC, 2020b, ID climatologique 7010565), la station EPV à la station Québec/Jean Lesage Intl (ECCC, 2020b, ID climatologique 701S001) et la station DEC à la station Deschambault (ECCC, 2020b, ID climatologique 7011983) (figure 1). Les roses des vents des quatre stations météorologiques, présentant la fréquence de la direction et la vitesse du vent horaires, sont disponibles à l'annexe B.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Corrélation et coefficient de divergence

La comparaison des moyennes annuelles de l'ensemble des données quotidiennes des quatre stations (figure 5) démontre bien la différence entre les milieux urbain et rural. Entre elles, les trois stations urbaines ont de forts coefficients de détermination (R^2), entre 0,71 et 0,75, qui suggèrent que leurs valeurs quotidiennes sont généralement soumises aux mêmes fluctuations. Sans surprise, la corrélation entre la station DEC et les stations urbaines est plus faible (figures 5d à 5f). Toutefois, les R^2 de 0,6 et 0,63 montrent qu'un lien modéré est présent, ce qui montre que les concentrations de $PM_{2,5}$ urbaines subissent une influence régionale.

Dans une ville où les saisons sont bien définies, entre autres par des écarts de température importants, ces dernières sont susceptibles de faire varier la relation entre des stations qui ne sont pas influencées par les mêmes sources d'émissions. De bonnes corrélations sont observées entre les stations urbaines VLI, EPV, SCG pour toutes les saisons avec des R^2 variant de 0,62 à 0,79 (figures 5a à 5c). Bien qu'elles soient faibles, les variations saisonnières du R^2 entre les stations peuvent renseigner sur certaines particularités. La comparaison de ces valeurs tend à démontrer que la station VLI possède des données estivales se démarquant de celles des stations EPV et SCG (figures 5a, 5b et 5c), en raison de la corrélation plus élevée entre ces deux dernières en été.

L'analyse des corrélations entre les stations urbaines et la station témoin DEC montre clairement qu'en été l'influence régionale est plus forte. En été, la valeur des R^2 est plus élevée, soit entre 0,66 et 0,73, comparativement à 0,58 à 0,62 en hiver.

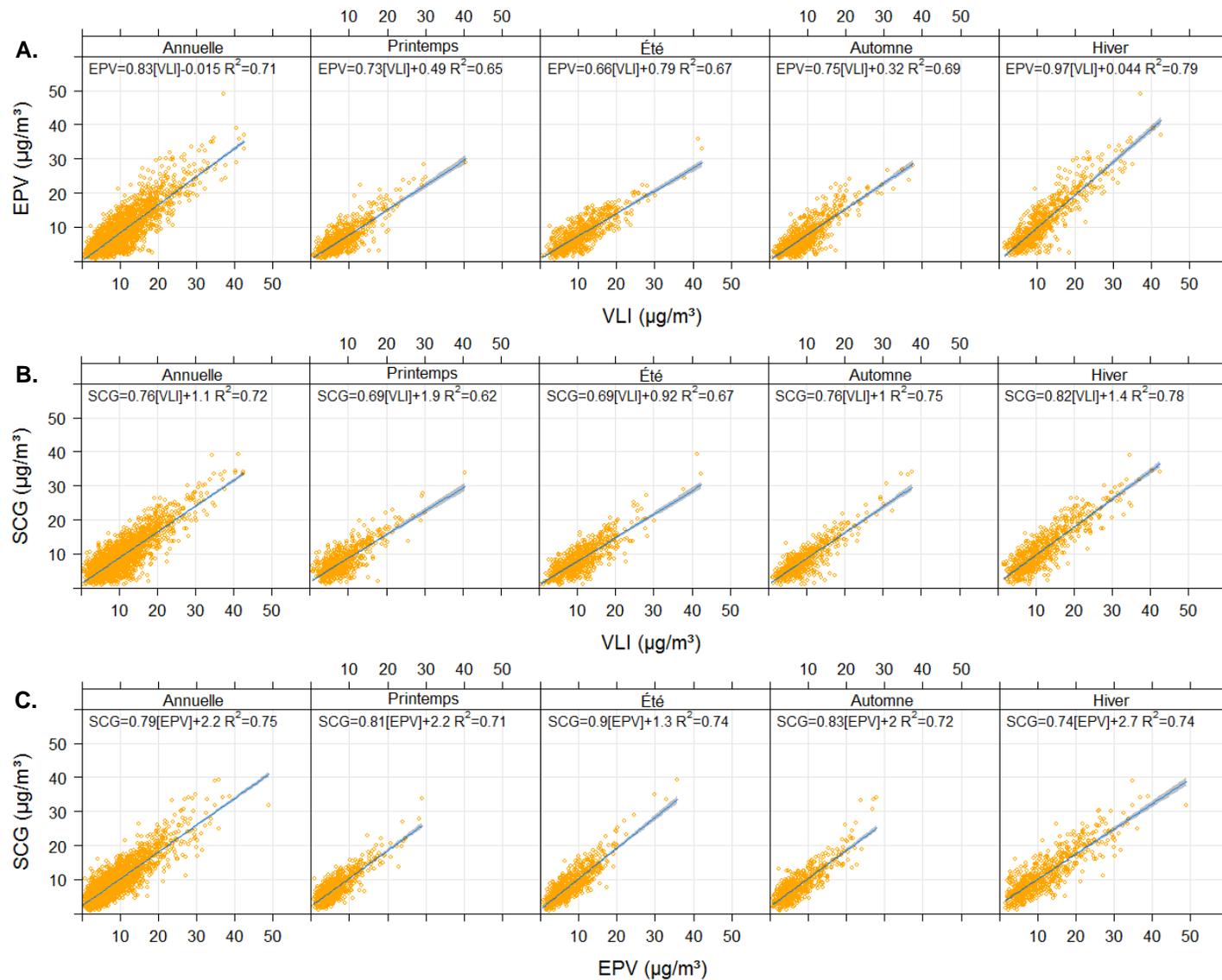


Figure 5 Corrélations annuelles et saisonnières entre les concentrations quotidiennes moyennes de particules fines des quatre stations de la région de Québec pour la période de 2010 à 2018

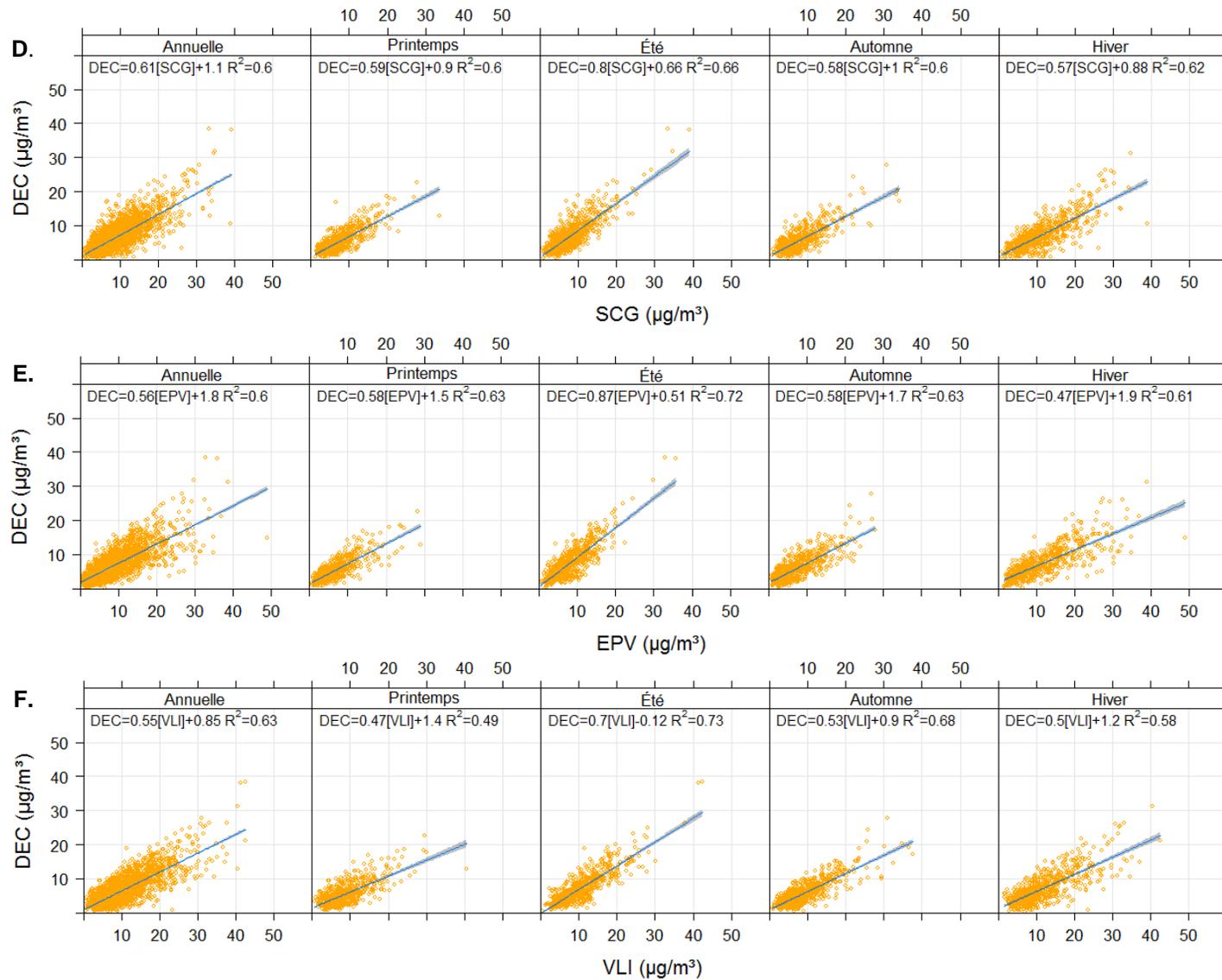


Figure 5 (suite) Corrélations annuelles et saisonnières entre les concentrations quotidiennes moyennes de particules fines des quatre stations de la région de Québec pour la période de 2010 à 2018

Le printemps et l'automne ne présentent pas de relation particulière. Les valeurs des R^2 observées de ces saisons sont à mi-chemin entre celles de l'été et de l'hiver. Leur nature transitoire, du point de vue des conditions climatiques, fait en sorte que, d'une année à l'autre, les concentrations de $PM_{2,5}$ de ces saisons sont moins constantes, comparativement à celles des saisons estivale et hivernale. Cela s'explique en partie par les sources de $PM_{2,5}$ saisonnières qui peuvent étendre leur influence aux saisons adjacentes selon les conditions climatiques, comme le chauffage résidentiel au bois.

Bien que l'analyse de corrélation entre les stations permette d'évaluer la similitude du patron des variations temporelles, elle n'indique pas si ces variations se font avec des concentrations similaires. Pour évaluer cet aspect, le coefficient de divergence (COD) est calculé entre chaque paire de stations. Pour les comparaisons annuelles (tableau 2), les valeurs du COD sont toutes légèrement supérieures au seuil de 0,2 indiquant une faible hétérogénéité entre les valeurs des données quotidiennes des quatre stations lorsqu'elles sont analysées globalement.

Tableau 2 Coefficient de divergence entre les concentrations quotidiennes moyennes de particules fines des quatre stations de la région de Québec pour la période de 2010 à 2018

	VLI	EPV	SCG	DEC
VLI	0	0,234	0,201	0,301
EPV	0,234	0	0,202	0,233
SCG	0,201	0,202	0	0,265
DEC	0,301	0,233	0,265	0

L'analyse des COD saisonniers (tableau 3) vient confirmer les observations faites avec l'analyse des corrélations. En été, le COD indique que les valeurs quotidiennes des paires de stations EPV-SCG et EPV-DEC sont homogènes avec des coefficients respectifs de 0,185 et 0,194. Les COD associés à la station VLI sont les plus élevés, confirmant une fois de plus que les valeurs quotidiennes de cette station sont différentes des autres en été.

En hiver, les stations VLI, EPV et SCG ont toutes un COD inférieur à 0,2 avec les autres stations urbaines et les coefficients sont les plus élevés lorsqu'elles sont comparées à la station DEC. Cela peut s'expliquer par une prédominance des sources d'émission locales en milieu urbain durant la saison hivernale.

Tableau 3 Coefficient de divergence saisonnier entre les concentrations quotidiennes moyennes de particules fines des quatre stations de la région de Québec pour la période de 2010 à 2018

		VLI	EPV	SCG	DEC
Printemps	VLI	0	0,243	0,211	0,315
	EPV	0,243	0	0,210	0,215
	SCG	0,211	0,210	0	0,258
	DEC	0,315	0,215	0,258	0
Été	VLI	0	0,252	0,224	0,263
	EPV	0,252	0	0,185	0,194
	SCG	0,224	0,185	0	0,222
	DEC	0,263	0,194	0,222	0
Automne	VLI	0	0,248	0,192	0,294
	EPV	0,248	0	0,223	0,235
	SCG	0,192	0,223	0	0,278
	DEC	0,294	0,235	0,278	0
Hiver	VLI	0	0,181	0,174	0,328
	EPV	0,181	0	0,189	0,284
	SCG	0,174	0,189	0	0,299
	DEC	0,328	0,284	0,299	0

3.2 Variations des concentrations de particules fines

3.2.1 Variations annuelles

Les médianes des concentrations horaires de $PM_{2,5}$, pour la période de 2010 à 2018, sont présentées à la figure 6 selon l'emplacement des stations dans l'axe ouest-est. La médiane la plus élevée est observée à la station VLI, suivie dans l'ordre par les stations SCG, EPV et DEC, avec des valeurs respectives de 8, 7, 6 et 5 $\mu g/m^3$. Les moyennes respectent aussi cet ordre avec des valeurs respectives de 10,0, 8,8, 8,2 et 6,4 $\mu g/m^3$. Les détails de ces données sont disponibles à l'annexe A. Les médianes des quatre stations sont significativement différentes (tests de Wilcoxon $p < 0,001$), ce qui est en accord avec les résultats des coefficients de divergence (tableau 2).

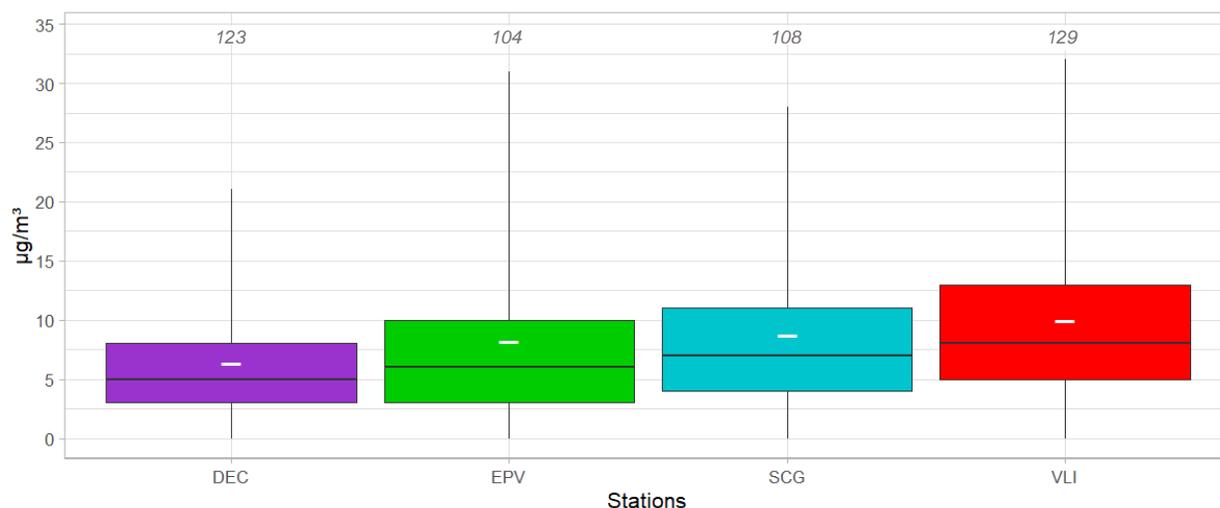


Figure 6 Concentrations de particules fines des quatre stations de la région de Québec pour la période de 2010 à 2018

Pour la période à l'étude, les concentrations sont croissantes d'ouest en est, ce qui d'un point de vue général est cohérent avec l'environnement des stations, en raison des sources d'émission locales et de la densité de population (figure 3), particulièrement pour les stations SCG et VLI. La moins grande variabilité des données de la station DEC s'explique par un environnement où les sources d'émission locales sont rares.

Les données détaillées de l'annexe A permettent de constater qu'à partir du 95^e centile les valeurs de la station EPV sont plus élevées que celles de la station SCG, à l'exception de la valeur maximale. Cela tend à démontrer que les concentrations élevées de $PM_{2,5}$ à la station EPV sont plus fréquentes qu'à la station SCG. De son côté, la station VLI présente les concentrations les plus élevées des trois stations urbaines. Toutefois, le 98^e centile des stations EPV et VLI est presque identique avec des valeurs de 31 et 32 $\mu g/m^3$ respectivement. Les résultats plus élevés de la station VLI s'expliquent par un plus grand nombre de sources d'émission dans ce secteur de la ville. Toutefois, cette explication générale ne peut pas s'appliquer pour la station EPV, en raison des sources d'émission potentielles se limitant principalement aux activités domestiques.

3.2.2 Variations saisonnières

L'analyse des variations saisonnières permet de constater que le climat a une influence marquée sur les concentrations de $PM_{2,5}$ des trois stations de Québec (figure 7). Les statistiques descriptives de la figure 7 sont disponibles à l'annexe C. Les médianes saisonnières ne présentent aucune ressemblance significative intra et interstations (tests de Wilcoxon $p < 0,001$). Les médianes de la station DEC sont les plus stables d'une saison à l'autre, avec des valeurs entre 5 et 6 $\mu g/m^3$. De leur côté, les trois stations urbaines

présentent des variations intersaisons plus importantes, indiquant la présence de sources d'émissions influencées par le climat. La station EPV est celle qui varie le plus, avec des valeurs médianes entre 5 et 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

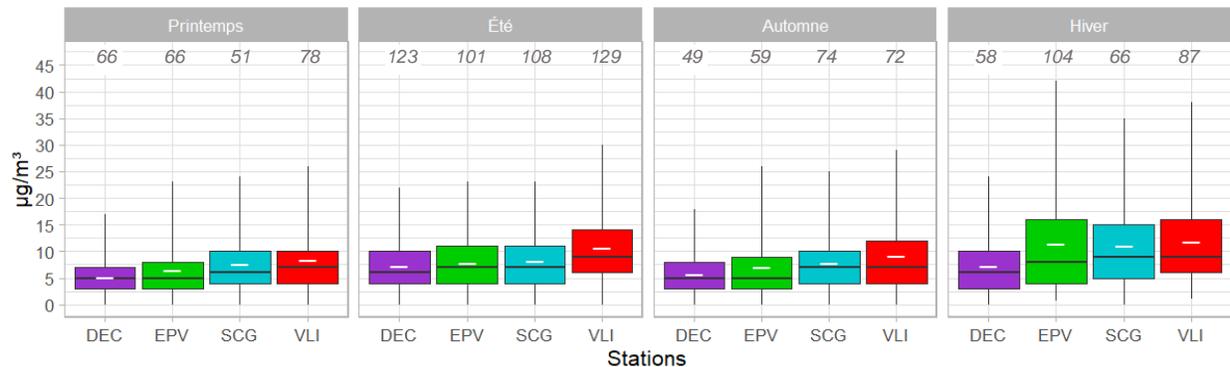


Figure 7 Concentrations saisonnières des particules fines des quatre stations de la région de Québec pour la période de 2010 à 2018

L'été est la saison où les concentrations de $\text{PM}_{2.5}$ sont les plus homogènes. Les stations EPV et SCG ont des centiles de valeurs égales, à l'exception du maximum, et ceux de la station DEC ont seulement 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de moins. Cette observation est cohérente avec les résultats du coefficient de divergence saisonnier du tableau 3. Bien que la station VLI ait une médiane légèrement supérieure à celles des autres stations urbaines, de 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, elle se démarque surtout par ses concentrations plus élevées pour les centiles au-delà de la médiane. Une plus grande variabilité est observée à cette station en été (tableau 4), avec un écart de 21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ entre la médiane et le 98^e centile, soit 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de plus par rapport aux autres stations. Ce constat démontre qu'en été des sources d'émission locales contribuent à faire augmenter les concentrations de $\text{PM}_{2.5}$ à cette station. Puisque cette situation ne s'observe pas uniquement en été, une bonne proportion des sources qui en sont responsables doivent être relativement constantes sur une base annuelle. Les émissions provenant des secteurs du transport et de l'industrie en sont donc probablement responsables.

La saison estivale est aussi la période de l'année où les concentrations maximales sont atteintes, à l'exception de la station EPV où le maximum hivernal est légèrement supérieur. En été, cela s'explique principalement par les feux de forêt qui transportent sur de grandes distances des concentrations élevées de $\text{PM}_{2.5}$.

Durant la période à l'étude, deux incendies de forêt majeurs ont influencé les données des stations de la région de Québec, soit en 2010 et en 2013. D'ailleurs, les maximums estivaux des quatre stations sont une conséquence des feux de forêt qui ont touché le nord du Québec à l'été 2013 (figure 7). Toutefois, les valeurs les plus élevées, qui ne sont pas incluses dans les analyses, sont la conséquence d'un feu de forêt survenu en Haute-Mauricie en mai 2010. Elles ont atteint, respectivement, 330, 325, 285 et 218 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ aux stations SCG, VLI, EPV et DEC.

Tableau 4 Écart entre le 98^e centile et la médiane des concentrations saisonnières de particules fines ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour la période de 2010 à 2018

Station	Printemps	Été	Automne	Hiver
VLI	19	21	22	29
EPV	18	16	21	34
SCG	18	16	18	26
DEC	12	16	13	18

En hiver, les concentrations sont plus élevées dans l'ensemble des stations, ce qui est normalement observé en milieu urbain où les hivers sont froids et où le chauffage au bois est présent (Bari et Kindzierski, 2017; Brook, Dann et al., 1999; Plain, 2017). Comme pour les autres saisons, l'écart entre les médianes hivernales des stations urbaines est très faible ($1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et l'écart maximal entre les moyennes est de $0,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Cette similitude est aussi confirmée par les résultats du coefficient de divergence (tableau 3). L'hiver se distingue des autres saisons par des écarts plus élevés entre la médiane et le 98^e centile, plus particulièrement chez les trois stations urbaines (tableau 4). À ce chapitre, la station EPV se démarque des autres avec un écart de $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ entre la médiane et le 98^e centile, comparativement à 29 et $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les stations VLI et SCG. De plus, sa concentration maximale est aussi la plus grande, par une marge de $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, par rapport à la seconde valeur la plus élevée (station VLI). Cela implique qu'une source d'émission locale et saisonnière provoque un apport plus important de $\text{PM}_{2,5}$ dans ce secteur de la ville.

L'écart entre les données estivales et hivernales est un autre aspect qui permet de souligner l'influence de l'hiver sur les concentrations de $\text{PM}_{2,5}$. À ce niveau, les rangs centiles supérieurs à la médiane sont encore l'élément distinctif, car l'écart progresse avec l'augmentation du rang centile (tableau 5). Au niveau du 98^e centile, la station EPV présente les écarts les plus grands avec un différentiel de $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$, suivie par la station SCG avec un écart de $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En raison de ses concentrations plus élevées en été, la station VLI obtient un écart plus faible de $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. L'écart de la station DEC est le plus petit avec $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ puisque l'influence des sources locales saisonnières est minime. Du côté des médianes (50^e centile), l'écart saisonnier est peu important avec un différentiel maximal de $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à la station SCG. Cette faible variation des médianes est probablement une conséquence de l'apport régional stable, en hiver comme en été.

Tableau 5 Écarts entre les valeurs hivernales et estivales ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) des rangs centiles des concentrations de particules fines pour la période de 2010 à 2018

Centile	VLI	EPV	SCG	DEC
50 ^e	0	1	2	0
75 ^e	2	5	4	0
95 ^e	8	14	9	0
98 ^e	8	19	12	2

Pour que les écarts des rangs centiles élevés, entre les données estivales et hivernales, soient aussi importants en milieu urbain, une source d'émission saisonnière capable de générer des concentrations élevées de $\text{PM}_{2,5}$ sur une base régulière doit être à l'œuvre. En hiver, ce type de source correspond essentiellement au chauffage au bois résidentiel. Bien que d'autres sources soient aussi à considérer, notamment le secteur du transport, leurs émissions ont un apport de moindre importance (MDDEP, 2011).

Finalement, les médianes les plus faibles sont observées au printemps et à l'automne, donnant à ces saisons un rôle de transition entre l'été et l'hiver. Toutefois, l'automne présente des valeurs légèrement plus élevées que celles du printemps à partir du 75^e centile. C'est à la station VLI que cette situation est la plus marquée. Cela laisse croire que l'arrivée des températures froides en automne influence à la hausse les concentrations de particules fines associées à des sources de combustion, telles que le chauffage au bois résidentiel et le transport. L'effet de ce dernier provient du fait que par temps froid les véhicules consomment plus de carburant (RNCAN, 2020).

3.2.3 Variations horaires saisonnières

L'analyse de la dynamique horaire des $\text{PM}_{2,5}$ permet de mieux comprendre les facteurs influençant leurs concentrations. La figure 8 présente les variations horaires saisonnières des concentrations moyennes de $\text{PM}_{2,5}$ provenant des quatre stations de la région de Québec. Aux trois stations urbaines, les médianes atteignent toutes un maximum de $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en fin de soirée en hiver, soit une variation par rapport à leur valeur médiane minimale de $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aux stations VLI et SCG et de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à la station EPV.

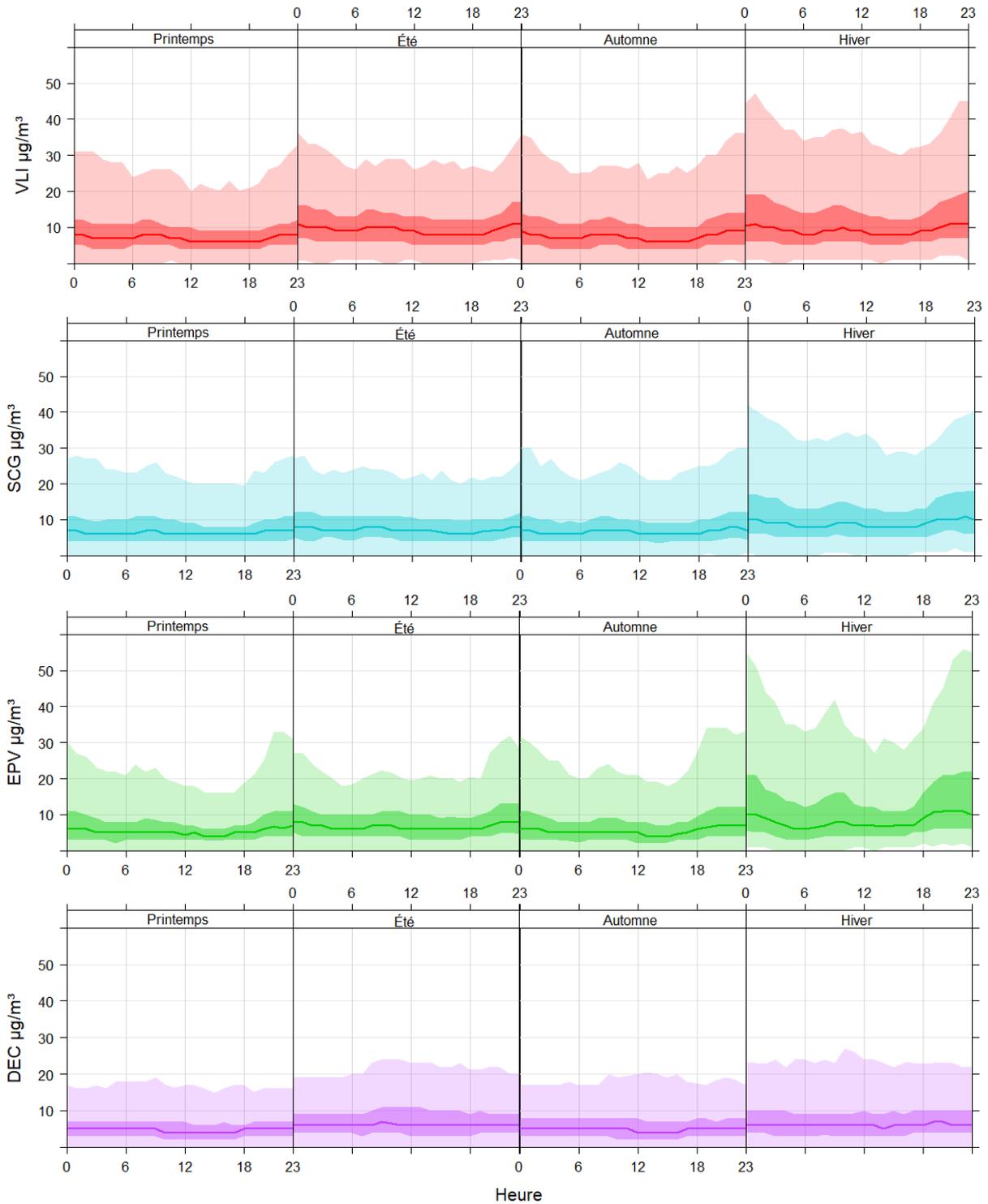


Figure 8 Concentrations médianes saisonnières des particules fines en fonction de l'heure de quatre stations de la région de Québec pour la période de 2010 à 2018. Le trait représente la médiane et les aires de couleurs foncées à pâles représentent, respectivement, les 25/75^{es} et 2/98^{es} centiles.

C'est aussi en hiver que l'amplitude des concentrations horaires est la plus élevée, avec des 98^{es} centiles atteignant des maximums de 45, 56 et 42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivement, aux stations VLI, EPV et SCG. À l'extérieur de la ville, la station DEC atteint son 98^e centile maximal en fin d'avant-midi, avec une valeur largement inférieure à 27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

C'est en début de nuit en hiver que surviennent les plus grandes variations horaires de concentration. Durant cette période, les écarts entre le 98^e centile et la médiane sont à leur maximum (tableau 6), avec un maximum de 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à la station EPV. Cette valeur est suivie, dans l'ordre, par celles des stations VLI, SCG et DEC. Ces variations démontrent qu'en hiver les trois stations urbaines, particulièrement la station EPV, subissent un apport important de particules fines en fonction du moment de la journée. Comme cette période correspond à un moment où la grande majorité de la population est à la maison, il est raisonnable de croire que le chauffage au bois soit le principal contributeur de cet apport, comme l'ont démontré les analyses d'Healy, Sofowote et al., (2017) sur le carbone noir, une des composantes des particules fines.

Tableau 6 Écarts maximaux ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) entre le 98^e centile et la médiane des concentrations horaires de particules fines pour la période de 2010 à 2018 par saison

Station	Printemps	Été	Automne	Hiver
VLI	25	25	27	36
EPV	27	24	27	45
SCG	21	20	23	32
DEC	14	18	17	21

Toujours en hiver, un deuxième pic quotidien, de moindre importance, est observé en avant-midi (entre 8 h et 10 h) aux stations VLI, EPV et SCG avec des 98^{es} centiles maximaux de 38, 42 et 34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ce pic correspond à la période où la population reprend ses activités quotidiennes. À la station EPV, où ce phénomène est le plus marqué, l'apport du chauffage au bois est sûrement responsable d'une bonne partie de cette hausse, car l'heure où survient la hausse et l'environnement de la station ne correspondent pas à une influence directe du transport routier.

L'été, le même patron s'observe, mais il est d'une ampleur plus faible. La station VLI présente les valeurs les plus élevées avec une médiane et un 98^e centile de 11 et de 36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, observés en début de nuit. Les stations EPV et SCG suivent respectivement avec des valeurs de 8 et 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et de 8 et 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les médianes et le 98^e centile, aussi observées en début de nuit. Cette similitude entre les patrons estival et hivernal des variations horaires de trois stations urbaines, aussi visibles au printemps et à l'automne, soulève des questions. En hiver, ce patron peut s'expliquer par les habitudes domestiques de chauffage au bois. Toutefois, en été cette explication ne peut s'appliquer. La comparaison des stations urbaines avec la station témoin démontre que les sources responsables de ce patron sont urbaines. Une des sources estivales potentielles pourrait être les feux de plaisance à ciel ouvert allumés par les résidents. De plus, une partie de cette hausse peut probablement s'expliquer par une vitesse du vent moins élevée en soirée et durant la nuit, favorisant une moins bonne dispersion des particules fines provenant des sources locales.

La hausse estivale de l'avant-midi semble correspondre à la reprise des activités anthropiques à un moment où les conditions de dispersion atmosphérique ne sont pas optimales. En l'absence du chauffage au bois résidentiel, cette augmentation est sous l'influence d'autres sources, notamment le transport routier. Cependant, l'analyse des concentrations de particules fines ne permet pas de déterminer l'origine de ces concentrations.

Toutes saisons confondues, les valeurs les plus faibles se produisent en après-midi et sont à leur minimum au printemps. Elles seraient une conséquence du réchauffement de la température de surface qui est à son maximum durant cette période, ce qui entrainerait une meilleure dispersion atmosphérique. D'ailleurs, cet effet varie dans le temps selon les saisons. En été, puisque la durée de l'ensoleillement est plus longue

qu'en hiver, ce creux se prolonge jusqu'à 20 h. En hiver, son effet s'estompe après 17 h. Le vent contribue aussi à ce phénomène, puisqu'il atteint sa vitesse maximale quotidienne au même moment.

3.2.3.1. Variations horaires saisonnières du carbone noir

L'analyse des variations horaires des particules fines démontre que le chauffage au bois résidentiel est un facteur influençant grandement ses concentrations en hiver. Pour valider ce constat, une analyse des variations horaires des concentrations de carbone noir, un constituant des particules fines, permet d'évaluer la provenance de ces dernières. En effet, le suivi du carbone noir permet de distinguer s'il provient de la combustion de carburant fossile (transport routier) ou de la combustion de biomasse (chauffage au bois). Cette évaluation est possible grâce à l'utilisation d'un analyseur mesurant l'absorption de lumière des aérosols à des longueurs d'onde spécifiques (Magee Scientific Aethalometer® Model AE33). Les longueurs d'onde plus longues, dans l'infrarouge, sont utilisées pour quantifier le carbone noir (carbone élémentaire), alors que les plus courtes, dans l'ultra-violet, fournissent une information sur les composés organiques, communément appelés carbone brun. Ce dernier provient de la combustion incomplète de la matière organique, comme c'est le cas avec le chauffage au bois. L'analyse de ces données s'est faite selon la méthode développée par Sandradewi, Prévôt et al., (2008) et Zotter, Herich et al., (2017), telle qu'elle a été présentée par Healy, Sofowote et al., (2017). L'analyse des données a été réalisée avec les paramètres prescrits par Zotter, Herich et al., (2017) pour les milieux influencés par le chauffage au bois (λ : 470 et 950 nm; α : 0,9 et 1,68). Il est important de préciser que cette méthode de quantification des sources de carbone noir possède un degré d'incertitude pouvant atteindre 25 % (Zotter, Herich et al., 2017) et que les paramètres de la méthode (α) ne sont probablement pas optimaux pour les conditions observées à Québec.

La figure 8 montre les variations horaires saisonnières (hiver et été) des concentrations de carbone noir issues de la combustion de carburant fossile et de la biomasse aux stations EPV et SCG, entre décembre 2018 et novembre 2019. Même si elles ne couvrent qu'une seule année, leur représentativité ne fait pas de doute, car elles montrent le même patron de variation horaire que les particules fines (figure 7). Elles constituent un bon indicateur de la provenance de ces dernières.

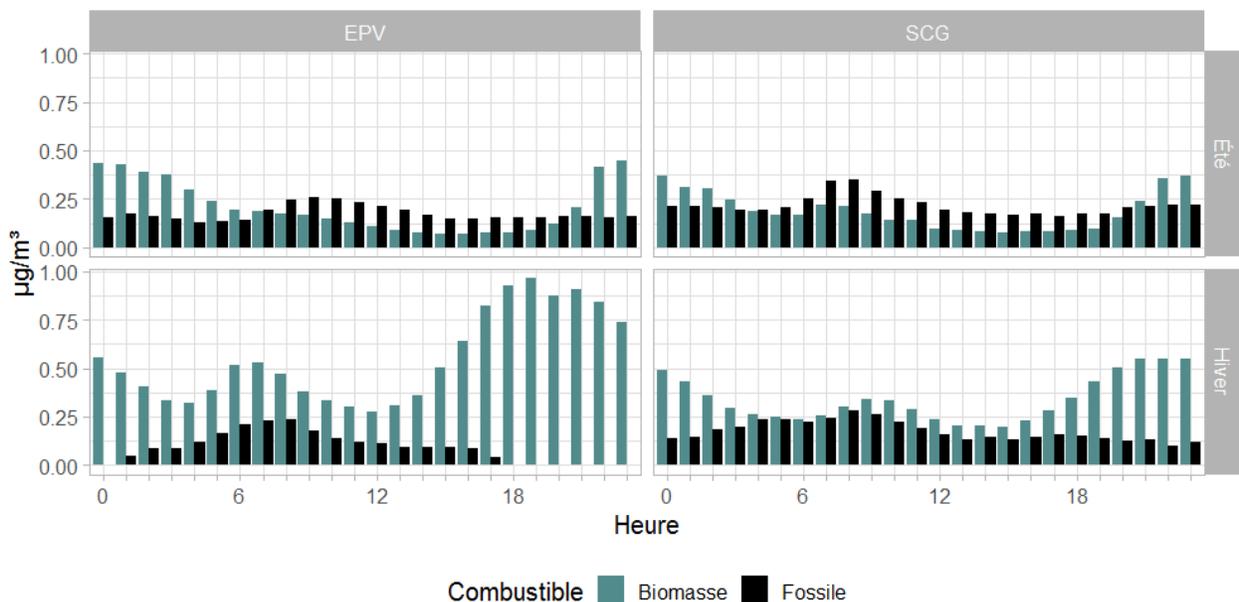


Figure 9 Concentrations moyennes horaires saisonnières de carbone noir selon leur source aux stations EPV et SCG pour la période de décembre 2018 à novembre 2019

En hiver, le carbone noir provenant de la combustion de biomasse domine à toutes heures de la journée. La station EPV est plus fortement influencée par le chauffage au bois, particulièrement en soirée où la contribution de la biomasse est largement supérieure à celle des carburants fossiles. Une hausse matinale est aussi présente aux deux stations. Même si l'apport des carburants fossiles est à son maximum, l'apport

de la combustion de la biomasse demeure supérieur. Ces résultats sont différents de ceux qu'ont obtenus Healy, Sofowote et al., (2017) qui ont observé une contribution plus élevée de la part de la combustion des carburants fossiles, peu importe la saison, dans neuf stations du sud de l'Ontario, où le climat moins froid ne favorise pas autant le chauffage au bois qu'au Québec.

L'été, les concentrations de carbone noir sont plus fortement influencées par la combustion fossile due au transport. Cela se remarque aux deux stations, notamment par le pic matinal et les concentrations globalement plus élevées associées aux carburants fossiles. La station SCG est la plus influencée par cette fraction des particules fines. La combustion de biomasse est aussi bien présente en été. En fin de soirée, sa contribution augmente au-delà de celle des carburants fossiles et perdure durant la nuit. En absence de chauffage au bois en été, cette hausse est probablement en partie attribuable aux feux de plaisance à ciel ouvert, qui sont généralement allumés après le coucher du soleil et aux conditions météorologiques favorisant la condensation de composés organiques semi-volatils qui surviennent au même moment.

L'ensemble de ces résultats sur le carbone noir démontre bien que la combustion de carburants fossiles et de biomasse a une influence sur les concentrations de particules fines des stations EPV et SCG. De plus, l'importance relative de ces sources varie entre les deux stations, en accord avec le type d'environnement de ces dernières.

3.2.4 Variations quotidiennes saisonnières

Les variations quotidiennes saisonnières de la figure 10 montrent qu'en hiver les concentrations de particules fines, de toutes les stations, augmentent graduellement du lundi au jeudi pour redescendre par la suite. Ce constat n'est pas uniquement local, car il s'observe aussi à la station DEC. Toutefois, en milieu urbain, ce phénomène est plus marqué en raison de la présence de sources d'émission locales. L'été, la situation inverse se produit, c'est-à-dire que les concentrations diminuent du lundi au jeudi et remontent par la suite jusqu'au dimanche. Cette fois-ci, l'apport local semble avoir un rôle moins important en raison de l'écart réduit entre les données des stations urbaines et celles de DEC. Une analyse des habitudes et des activités quotidiennes saisonnières de la population pourrait probablement aider à comprendre les fluctuations quotidiennes des concentrations de particules fines.



Figure 10 Concentrations médianes quotidiennes saisonnières des particules fines des quatre stations de la région de Québec pour la période de 2010 à 2018

Les variations horaires quotidiennes (figure 11) confirment que les concentrations de particules fines du jeudi sont globalement plus élevées en hiver, de jour comme de nuit, particulièrement aux stations VLI et SCG. Les concentrations médianes de fin de soirée y sont les plus élevées de la semaine. D'ailleurs, la concentration médiane de la station EPV subit une hausse de 133 % ($8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) entre 15 h et 21 h. Les concentrations de fin de soirée semblent être responsables d'une bonne partie de la valeur quotidienne, mais les données plus élevées du début de l'avant-midi montrent que le niveau d'activité locale est aussi plus important en matinée le jeudi. Les concentrations du samedi soir arrivent deuxième en importance, mais elles atteignent leur maximum de façon plus progressive que le jeudi, probablement parce qu'une grande proportion de la population ne travaille pas. En été, à la station VLI, les concentrations médianes augmentent rapidement en début de soirée, le vendredi et le samedi, pour atteindre des valeurs plus élevées qu'en hiver. D'ailleurs, comme le montre la figure 8, les plus grandes concentrations de cette station la distinguent des autres, chaque jour de la semaine.

Les figures 10 et 11 illustrent une différence entre les données observées en semaine et celles qui sont observées la fin de semaine. Puisque certaines sources d'émissions de $\text{PM}_{2.5}$ varient selon le rythme des activités humaines, notamment le transport routier et le chauffage au bois résidentiel, il est normal qu'une différence existe entre les deux périodes. Ainsi, une analyse de ces variations est susceptible de fournir une information supplémentaire sur les sources influençant les données des stations. La figure 12 compare les variations en fonction de l'heure pour les périodes de la semaine et de la fin de semaine. Ces données démontrent que les concentrations de $\text{PM}_{2.5}$ sont globalement plus élevées durant la période diurne en semaine, peu importe la saison. Cette observation est plus apparente à la station VLI et tend à diminuer en s'éloignant vers la station EPV, ce qui semble confirmer l'influence accrue du transport routier en semaine (Walsh et Brière, 2018). Les valeurs diurnes plus élevées en hiver sont aussi un indice supplémentaire de cette influence, en raison de la plus grande consommation de carburant des véhicules par temps froid (RNCAN, 2020). La station EPV est la seule à faire exception à ce constat. La hausse des concentrations en avant-midi semble largement conditionnée par le chauffage au bois. Elle est la seule à présenter une hausse marquée du 98^e centile durant cette période la fin de semaine. D'ailleurs, au même moment, la station SCG montre une baisse. Cela laisse croire que la hausse en semaine à la station EPV serait aussi sous l'influence du chauffage au bois.

Les concentrations nocturnes de $PM_{2.5}$ des stations VLI, EPV et SCG sont plus grandes la fin de semaine. Cet écart avec les données observées en semaine est plus grand l'été. Tel que mentionné précédemment, les feux de plaisance à ciel ouvert peuvent expliquer une part de cette hausse, puisque cette activité de loisir est plus susceptible de se produire la fin de semaine en été. Les soirées d'été sont aussi des moments propices à une multitude d'activités extérieures par rapport à l'hiver, en raison de la température plus clémente. D'ailleurs, la station EPV présente encore une particularité, car elle est la seule où une hausse marquée du 98^e centile est observée en soirée en semaine en été. En hiver, les hausses de fin de soirée sont de plus grande amplitude autant la fin de semaine qu'en semaine, en raison du chauffage résidentiel au bois. Cependant, les 98^{es} centiles plus élevés la fin de semaine des stations situées dans des secteurs résidentiels (EPV et SCG) sont une indication que le chauffage au bois résidentiel, en plus d'être utilitaire, est aussi une activité de plaisance.

Globalement, les figures 10, 11 et 12 permettent de constater qu'en été les valeurs médianes sont moins élevées la semaine que la fin de semaine, mais statistiquement différentes uniquement aux stations EPV et SCG (tests de Wilcoxon $p < 0,005$). En hiver, le contraire se produit, les valeurs en semaine sont statistiquement supérieures à celles de la fin de semaine à toutes les stations (tests de Wilcoxon $p < 0,05$). Cette observation est à l'opposé de ce qui a été observé à Montréal par Carter, Germain et al., (2004). Le secteur du transport est probablement à l'origine de cette situation. Comme son influence est plus grande en semaine et qu'en hiver les véhicules émettent une plus grande quantité de contaminants, son apport ferait augmenter les concentrations de particules fines (Plain, 2017). En été, sans cet apport supplémentaire, les concentrations seraient moins élevées.

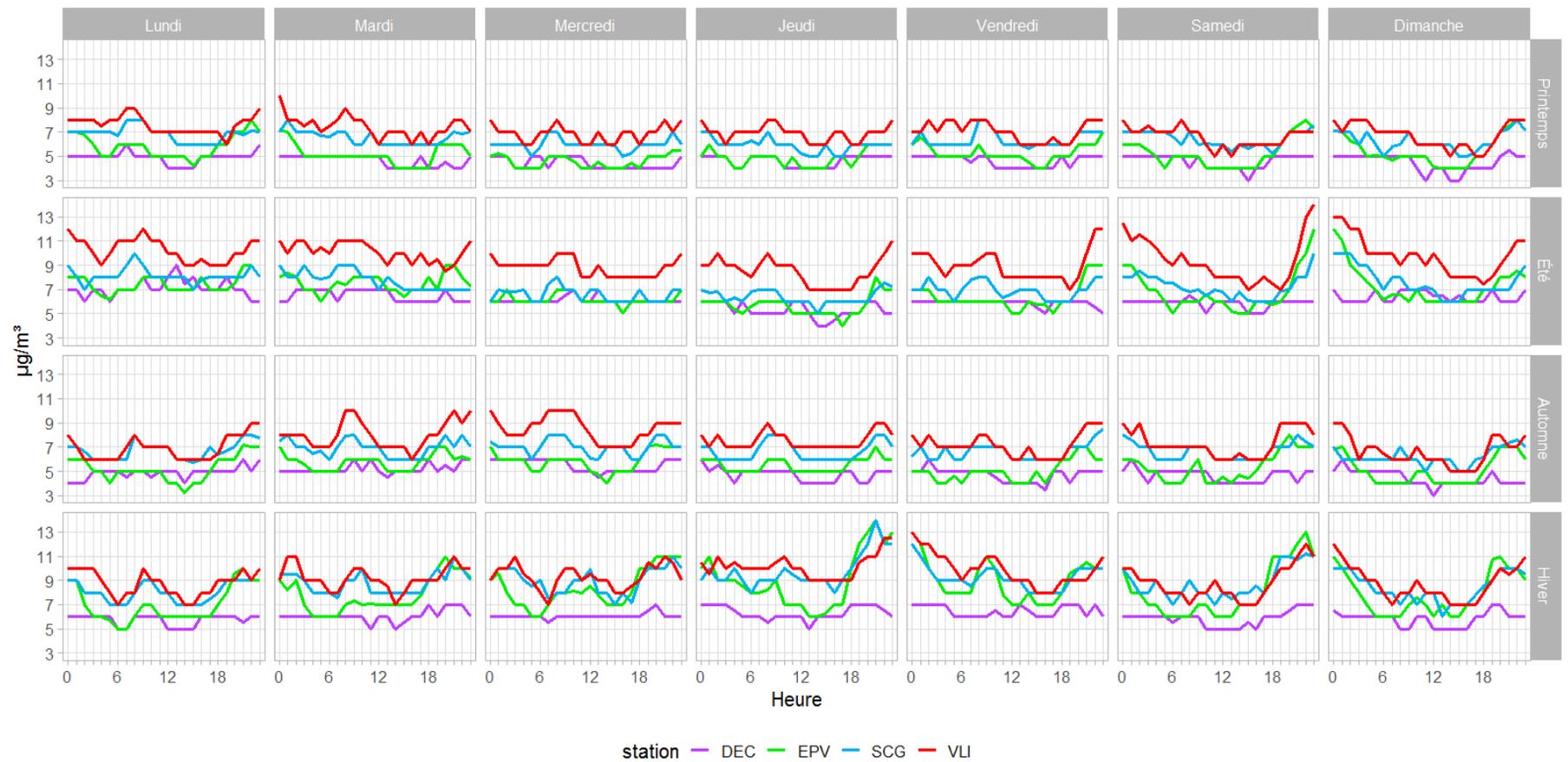


Figure 11 Concentrations médianes horaires quotidiennes par saison des médianes de particules fines des quatre stations de la région de Québec pour la période de 2010 à 2018

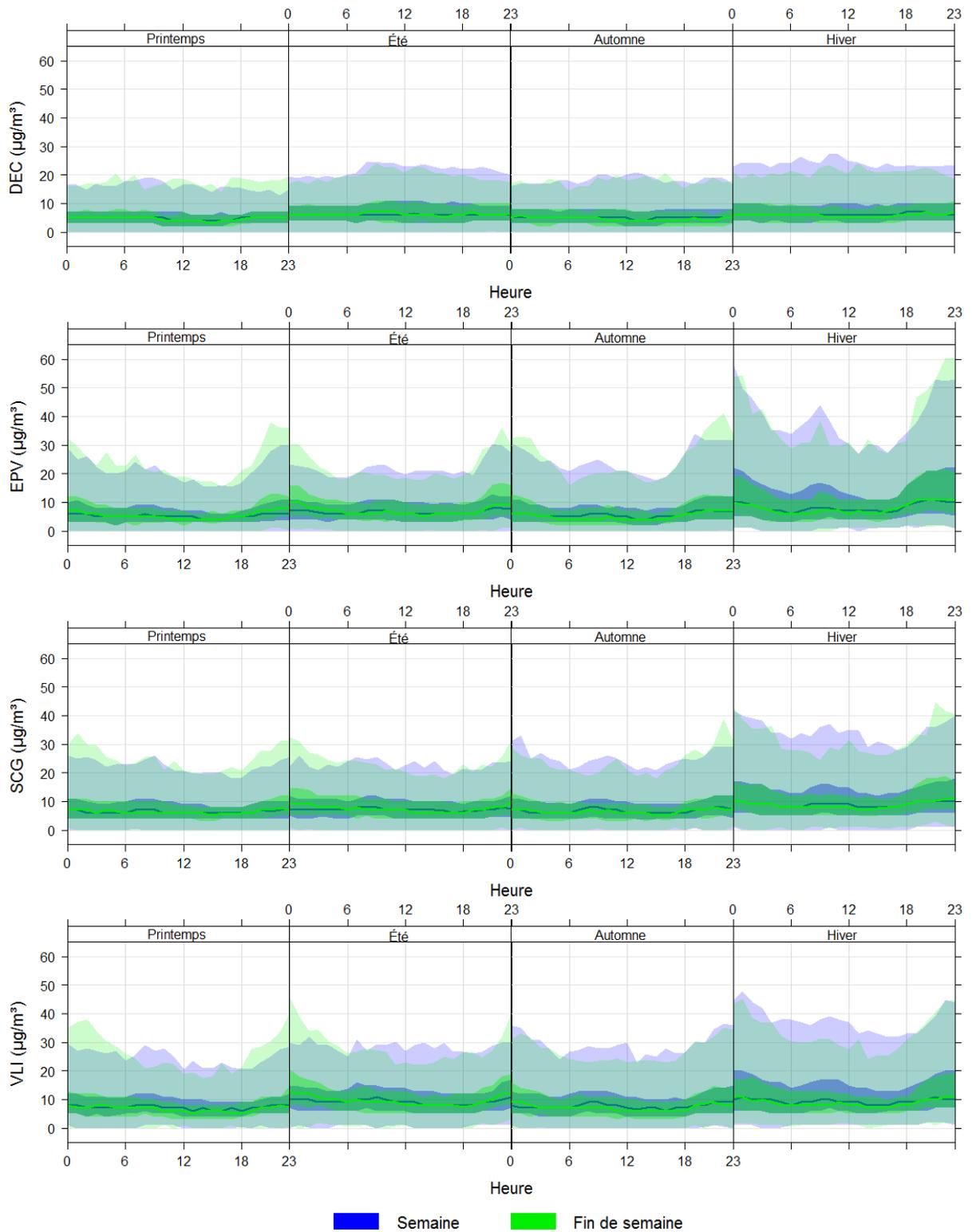


Figure 12 Concentrations médianes saisonnières des particules fines, en fonction de l'heure et du moment de la semaine, des quatre stations de la région de Québec pour la période de 2010 à 2018. Le trait représente la médiane et les aires de couleurs foncées à pâles représentent, respectivement, les 25/75^e et 2/98^e centiles.

3.2.5 Estimation de l'apport local saisonnier

L'apport local aux concentrations de PM_{2,5} mesurées aux trois stations urbaines de Québec peut être estimé à l'aide de la station DEC. En raison de son emplacement et suite à l'analyse des données qui semblent exemptes d'influences locales (figures 8, 10, 11 et 12), la station peut être considérée comme représentative du niveau de fond de la région de Québec. Ainsi, en soustrayant les concentrations saisonnières de la station DEC aux stations VLI, EPV et SCG, les écarts obtenus peuvent être considérés comme une estimation de l'apport local saisonnier pour chaque station. Le tableau 7 présente les écarts saisonniers des trois stations urbaines par rapport à la station DEC.

L'été est la saison où l'apport local est le plus faible. Les écarts des stations EPV et SCG sont d'un maximum de 1 µg/m³ avec la station DEC. C'est la station VLI qui présente l'apport local le plus élevé, avec des écarts qui augmentent avec la hausse des rangs centiles, pour atteindre un maximum de 8 µg/m³ au 98^e centile.

Tableau 7 Écarts saisonniers entre les concentrations de particules fines des stations urbaines de la ville de Québec et celles de la station témoin pour la période de 2010 à 2018

Saison	Station	Centile (µg/m ³)					
		10 ^e	25 ^e	50 ^e	75 ^e	95 ^e	98 ^e
Printemps	VLI	1	1	2	3	7	9
	EPV	0	0	0	1	5	6
	SCG	1	1	1	3	6	7
Été	VLI	1	2	3	4	6	8
	EPV	0	0	1	1	1	1
	SCG	0	0	1	1	1	1
Automne	VLI	1	1	2	4	8	11
	EPV	0	0	0	1	5	8
	SCG	1	1	2	2	5	7
Hiver	VLI	3	3	3	6	14	14
	EPV	1	1	2	6	15	18
	SCG	2	2	3	5	10	11

C'est en hiver que l'apport local est le plus important. À partir du 75^e centile, les écarts se creusent avec un minimum de 5 µg/m³ à la station SCG et un maximum de 18 µg/m³ au 98^e centile de la station EPV. Cette dernière, en plus d'avoir l'apport local le plus élevé en hiver, possède aussi l'apport le plus faible pour le 10^e, le 25^e et le 50^e centile. Ce contraste est probablement causé par le fait que le chauffage au bois est la source la plus importante de particules fines et que son influence est conditionnée par les paramètres de dispersion atmosphérique.

Durant les saisons transitoires (printemps et automne), les concentrations médianes de particules fines urbaines sont similaires au niveau de fond régional. C'est uniquement à partir du 75^e centile que l'apport local devient supérieur à 2 µg/m³.

De façon générale, la station VLI présente les apports locaux les plus élevés, à l'exception des 95^e et 98^e centiles hivernaux, suivis dans l'ordre par les stations SCG et EPV. D'une saison à l'autre, les concentrations médianes de l'apport local ne dépassent pas 3 µg/m³. Cette valeur implique que l'apport local représenterait une proportion maximale de 33 % de la valeur médiane calculée (annexe C). Les deux tiers restants seraient le résultat de l'apport régional. Au 98^e centile, l'apport local en hiver de la station

EPV est de $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et représente une proportion de 43 % de la valeur calculée. C'est dans les concentrations les plus faibles, au 10^e centile, que la proportion de l'apport local est la plus élevée, atteignant jusqu'à 75 % à la station VLI, en hiver.

3.3 Tendances

Pour la période de 2010 à 2018, l'analyse des tendances désaisonnalisées des médianes des concentrations mensuelles montre des baisses significatives aux stations SCG ($p < 0,05$) et VLI ($p < 0,001$) (figures 13c et 13d). Pour la station VLI, cette tendance est cohérente avec celle qui a été observée par Foucreault (2019) pour la période antérieure de 1998 à 2009, où une baisse significative est observée ($p < 0,01$). À l'inverse, la station EPV (figure 13b) présente une augmentation significative ($p < 0,001$). De son côté, la station DEC (figure 13a) ne dévoile aucune tendance significative, ce qui indique que l'apport régional est relativement stable pour la période à l'étude. Toutefois, pour les stations EPV et DEC, la disponibilité des données rend possible l'observation des tendances sur une plus longue période (annexe D). Ainsi, de 2005 à 2018, aucune tendance significative n'est observée à la station EPV (annexe D) et une tendance significative ($p < 0,001$) à la baisse est présente à la station DEC pour la période de 2003 à 2018.

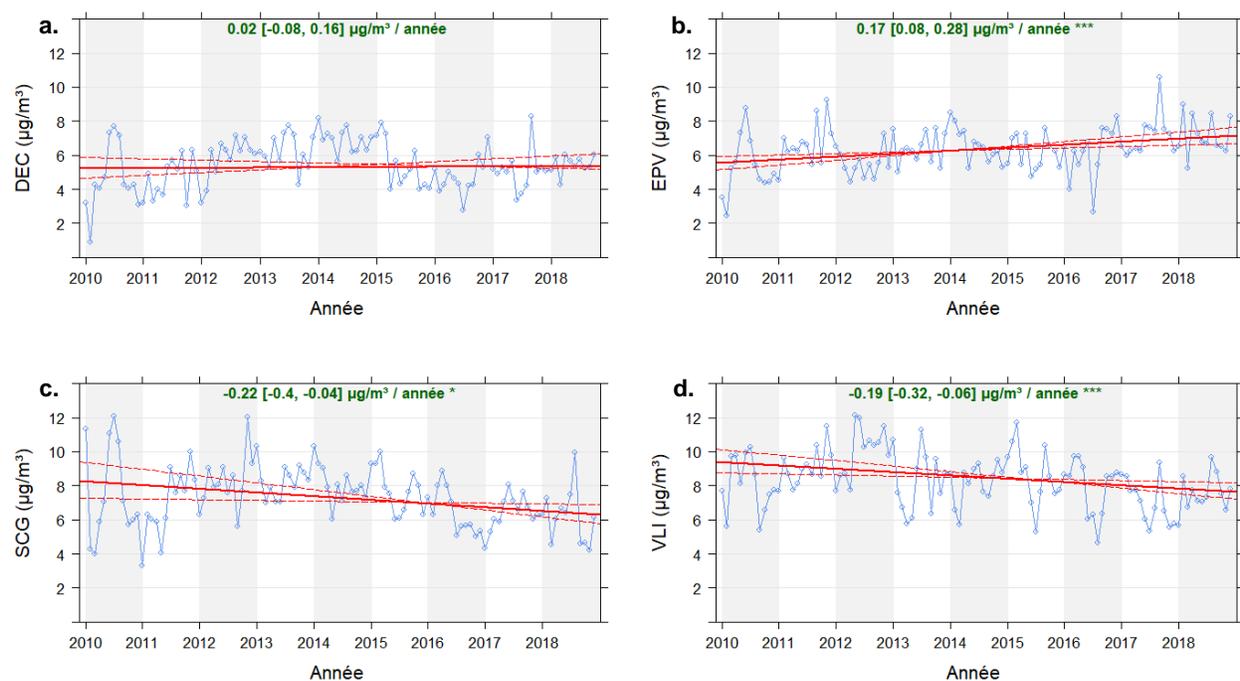


Figure 13 Tendances désaisonnalisées des concentrations médianes mensuelles de particules fines aux stations de la région de Québec, pour la période de 2010 à 2018

Les tendances des valeurs du 98^e centile des concentrations mensuelles de particules fines démontrent aussi que la station EPV se démarque des autres stations à l'étude. En effet, les stations DEC, SCG et VLI (figures 14a, 14c et 14d) ont toutes une tendance significative à la baisse ($p < 0,001$), alors que les résultats mensuels de la station EPV (figure 14b) sont stables et sans tendance. Sur des périodes plus longues, les données de l'annexe D démontrent que les 98^{es} centiles des stations DEC et EPV ont des tendances significatives à la baisse ($p < 0,001$).

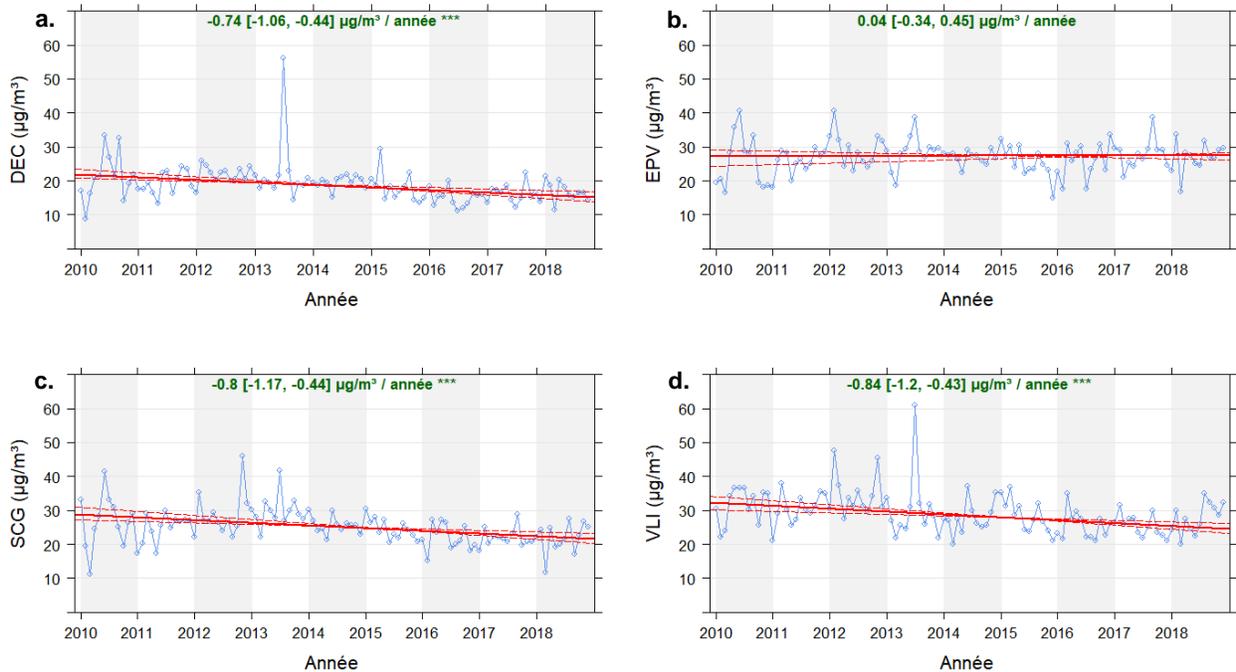


Figure 14 Tendances désaisonnalisées des 98^{es} centiles horaires mensuels des particules fines aux stations de la région de Québec, pour la période de 2010 à 2018

Les tendances saisonnières des médianes et des 98^{es} centiles ne présentent aucune tendance divergente de celles des figures 13 et 14. Elles sont disponibles à l'annexe E.

3.4 Direction et vitesse du vent

La direction et la vitesse du vent ont une influence importante sur les concentrations de particules fines. De façon générale, la direction du vent peut faire varier les sources d'émission influençant une station et la vitesse du vent aura un effet sur les conditions de dispersion atmosphérique. Les roses des vents associées aux quatre stations à l'étude se trouvent à la figure 2 (EPV) et à l'annexe A (DEC, SCG et VLI). Les figures 15 et 16 démontrent bien l'influence de ces deux paramètres météorologiques sur les concentrations médianes de particules fines aux stations de la région de Québec.

Étant située dans un secteur résidentiel à l'extrémité ouest de la ville, la station EPV (figure 15b) présente des concentrations ayant de faibles variations selon la direction du vent. Seul le vent du sud-ouest crée une légère augmentation des valeurs. Une hausse des concentrations est aussi observée avec la diminution de la vitesse du vent, car cette dernière est l'un des principaux facteurs responsables de la dispersion atmosphérique des PM_{2,5}. L'hiver est la saison où les concentrations par vent faible sont les plus élevées en raison de l'apport local du chauffage au bois résidentiel. L'effet de ce dernier est mis en évidence par les valeurs élevées des 98^{es} centiles des trois stations urbaines (figure 16b).

La station SCG (figure 15c), située dans un milieu plus densément peuplé que celui de la station EPV (figure 3), présente des concentrations relativement plus élevées dans les axes de ses vents dominants de l'ouest-sud-ouest et de l'est-nord-est (annexe B) et en fonction de la vitesse du vent par rapport à la station EPV. L'apport de contaminants en provenance du sud-ouest et du nord-est est plus présent pour les valeurs plus élevées du 98^e centile (figure 16c). Comme aux stations EPV et DEC, les concentrations augmentent avec la diminution de la vitesse du vent.

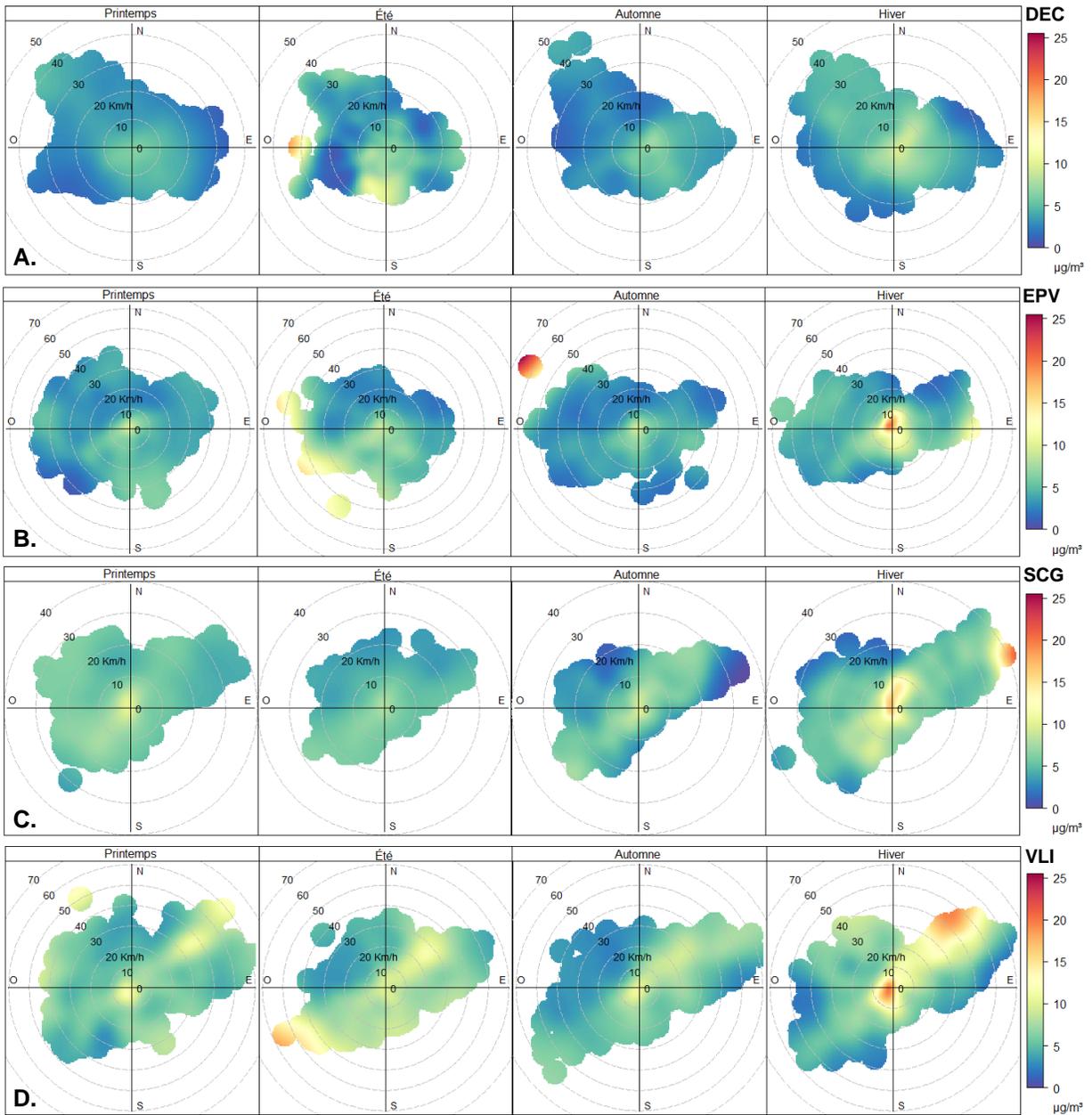


Figure 15 Concentrations médianes saisonnières des particules fines en fonction de la direction et de la vitesse du vent de quatre stations de la région de Québec, pour la période de 2013 à 2018. Il est à noter que les valeurs en bordure du nuage de données peuvent être des artefacts dus à des valeurs uniques.

Les résultats de la station VLI (figures 15d et 16d) sont aussi représentatifs de son milieu, où les secteurs résidentiel, commercial et industriel se côtoient, générant des concentrations plus élevées, peu importe la saison. Ils se distinguent toutefois des résultats des autres stations à l'étude, puisque les concentrations ne diminuent pas avec l'augmentation de la vitesse du vent lorsque le vent souffle du nord-est. Elles demeurent relativement constantes jusqu'à des vents soufflant à plus de 40 km/h en provenance du nord-est; elles ont même tendance à augmenter légèrement, surtout en hiver. Cette observation indique qu'une ou plusieurs sources d'émission sont présentes au nord-est de la station. Toutefois, l'apport de $PM_{2,5}$ provenant de cette direction ne provoque pas les concentrations les plus élevées, ces dernières ont une provenance de l'ouest et du sud-ouest. Elles présentent des valeurs maximales de la médiane et du 98^e centile près de deux fois plus élevées que celles provenant du nord-est. Les concentrations de $PM_{2,5}$ les plus élevées surviennent par vent faible (<10 km/h).

Les données de la station DEC démontrent bien que l'influence de sources locales, particulièrement en hiver, est largement supérieure en milieu urbain, en raison de ses concentrations moins élevées par vent faible.

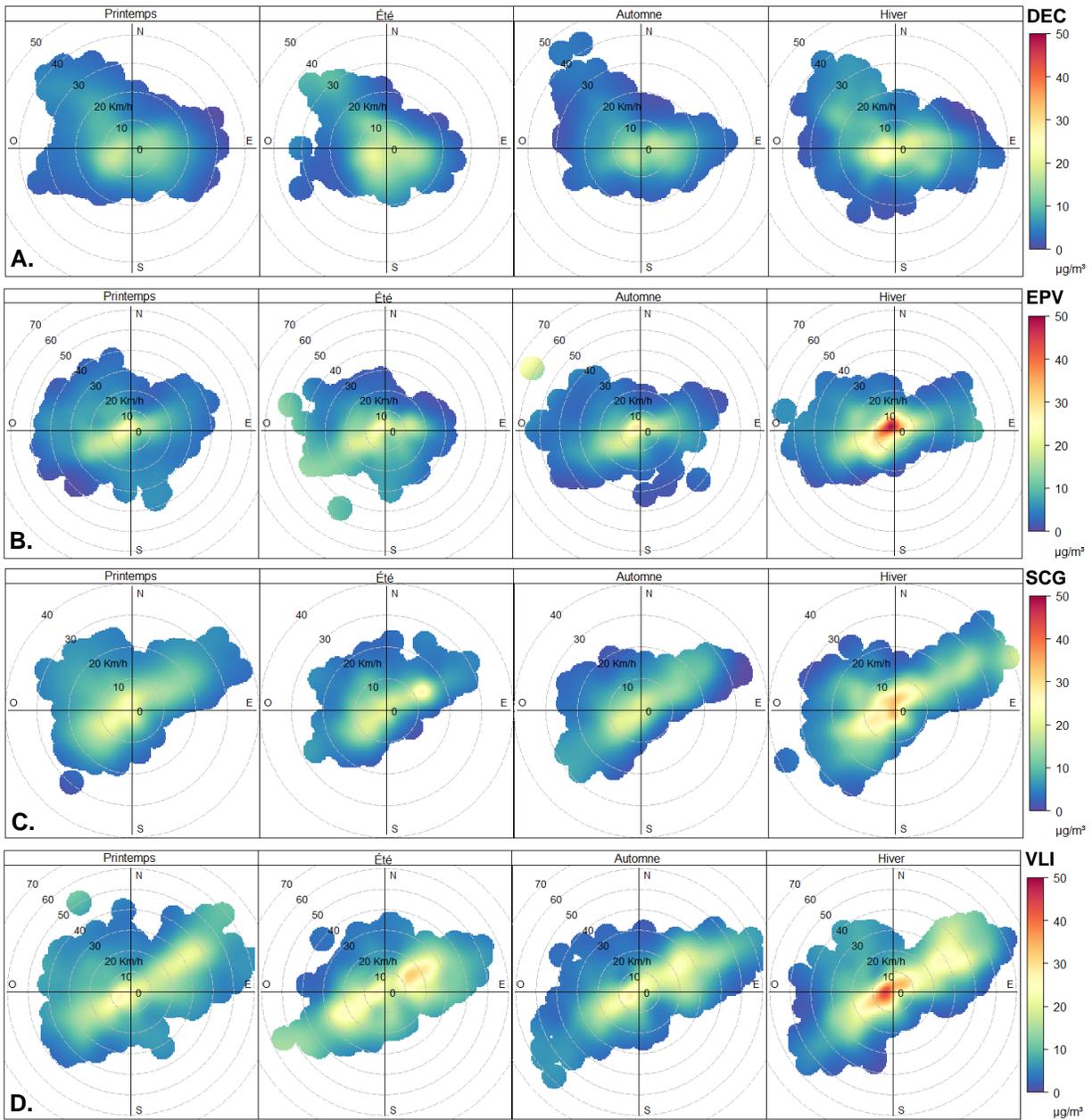


Figure 16 Concentrations saisonnières des 98^{es} centiles des particules fines en fonction de la direction et de la vitesse du vent de quatre stations de la région de Québec, pour la période de 2013 à 2018. Il est à noter que les valeurs en bordure des plages de données peuvent être des artefacts dus à des valeurs uniques.

4. CONCLUSION

Finalement, la variabilité des concentrations de particules fines observée dans les stations de la ville de Québec démontre que de nombreux facteurs peuvent influencer ces données. Normalement, les sources d'émission, les conditions météorologiques et le relief sont les principaux éléments influençant les concentrations d'un contaminant atmosphérique. Dans ce rapport, de nombreux indices, tels que l'analyse du carbone noir, permettent de constater que le chauffage au bois résidentiel est une source majeure de particules fines.

D'autres sources ont aussi des répercussions, notamment le transport routier dans les secteurs à plus forte densité de population. Toutefois, l'ampleur de leur contribution aux concentrations de $PM_{2,5}$ est difficile à estimer car il n'est pas possible de les départager.

Cette étude amène un premier portrait détaillé dédié à l'ensemble des variations spatio-temporelles des concentrations de $PM_{2,5}$ provenant des trois stations sur le territoire de la ville de Québec. En incluant les données du niveau de fond régional dans les analyses, une meilleure appréciation de l'apport des sources d'émissions locales a aussi été obtenue. Ainsi, la station Québec – Vieux-Limoilou est celle qui présente les variations se démarquant le plus, en raison de ses concentrations estivales plus élevées. Son emplacement, qui l'expose à un plus grand nombre de sources, pourrait expliquer cette situation. C'est aussi celle qui démontre les plus grandes divergences avec les concentrations du niveau de fond régional, peu importe la saison. En hiver, les variations entre les stations sont moins importantes, mais elles mettent en évidence l'effet du chauffage au bois résidentiel avec d'importants pics de concentration en fin de soirée. C'est à la station Québec – École Les Primevères que ces écarts de concentrations horaires sont les plus importants. D'ailleurs, cette station est la seule à présenter une tendance à la hausse de ses concentrations sur la période à l'étude.

Pour bien qualifier et quantifier les sources influençant les concentrations de particules fines, des connaissances supplémentaires seraient nécessaires. Parmi celles-ci, une meilleure connaissance de la composition des particules fines, une analyse des précurseurs des $PM_{2,5}$ d'origine secondaire et de l'effet des conditions climatiques en lien avec la topographie permettraient de mieux comprendre la dynamique des particules fines à Québec. Au cours des prochaines années, il sera intéressant de voir comment évolue les concentrations de $PM_{2,5}$ avec, notamment, la mise en place d'un réseau structurant de transport en commun et la nouvelle réglementation sur les appareils de chauffage au bois.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BARI, M. A., et W. B. KINDZIERSKI (2017). « Characteristics of air quality and sources affecting fine particulate matter (PM_{2.5}) levels in the City of Red Deer, Canada », *Environmental Pollution*, vol. 221, p. 367-376.
- BISSON, M., et D. BUSQUE (2010). *La qualité de l'air à Québec de 1994 à 2008*, Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Direction du suivi de l'état de l'environnement, 12 p., [En ligne], [<http://www.environnement.gouv.qc.ca/air/ambiant/rapport1994-2008.pdf>].
- BROOK, J. R., T. F. DANN et Y. BONVALOT (1999). « Observations and Interpretations from the Canadian Fine Particle Monitoring Program », *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 49(9), p. 35-44.
- CARSLAW, D. C. (2019). *The openair manual – open-source tools for analysing air pollution data, Manual for version 2.6-5*, University of York, [En ligne], [<https://davidcarslaw.com/files/openairmanual.pdf>].
- CARSLAW, D. C., et K. ROPKINS (2012). « Openair – An R package for air quality data analysis », *Environmental Modelling & Software*, vol. 27-28, p. 52-61.
- CARTER, A.-M., A. GERMAIN, J. ROUSSEAU, M. BISSON et C. GAGNON (2004). *Campagne d'échantillonnage sur le chauffage résidentiel au bois. Rapport d'étude : 1999 à 2002*, Montréal, Environnement Canada, Service de la protection de l'environnement, 98 p., [En ligne], [<http://publications.gc.ca/site/eng/9.631638/publication.html>].
- DIRECTION DE SANTÉ PUBLIQUE (2018). *Projet « Mon environnement, ma santé » : volet de la qualité de l'air extérieur. Bilan initial de la qualité de l'air extérieur et ses effets sur la santé*, Québec, Centre intégré universitaire de santé et de services sociaux de la Capitale-Nationale, 96 p., [En ligne], [http://cvap.quebec/wp-content/uploads/2015/01/bilan_initial_gae_2019-02-27.pdf].
- ENVIRONNEMENT ET CHANGEMENT CLIMATIQUE CANADA (2020a). *Données des stations pour le calcul des normales climatiques au Canada de 1981 à 2010, station Québec/Jean Lesage intl*, 8 octobre 2019, [En ligne], [https://climate.weather.gc.ca/climate_normals/results_1981_2010_f.html?stnID=5251&autofwd=1].
- ENVIRONNEMENT ET CHANGEMENT CLIMATIQUE CANADA (ECCC) (2020b). Conditions météorologiques et climatiques passées – Données historiques, [En ligne], Gouvernement du Canada [https://climat.meteo.gc.ca/historical_data/search_historic_data_f.html].
- FOUCREULT, M.-A. (2016). *Analyse des concentrations de particules fines attribuables au chauffage au bois dans la municipalité de Lac-Beauport*, Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction générale du suivi de l'état de l'environnement, 7 p. + 1 annexe, [En ligne], [<http://www.environnement.gouv.qc.ca/air/Lac-Beauport/lac-Beauport.pdf>].
- FOUCREULT, M.-A. (2019). *Bilan de la qualité de l'air au Québec 2016*, Québec, ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction générale du suivi de l'état de l'environnement, 25 p. + 8 annexes, [En ligne], [www.environnement.gouv.qc.ca/air/bilan/qualite-airquebec-2016.htm].
- FOX, J., et M. BOUCHET-VALAT (2019). « Rcmdr: R Commander. R package version 2.6-1 », [En ligne], [<https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Misc/Rcmdr/>].

- HEALY, R. M., U. SOFOWOTE, Y. SU, J. DEBOSZ, M. NOBLE, C. H. JEONG, J. M. WANG, N. HILKER, G. J. EVANS, G. DOERKSEN, K. JONES et A. MUNOZ (2017). « Ambient measurements and source apportionment of fossil fuel and biomass burning black carbon in Ontario », *Atmospheric Environment*, vol. 161, p. 34-47.
- INSTITUT NATIONAL DE SANTÉ PUBLIQUE DU QUÉBEC (INSPQ) (2012). *Bilan de la qualité de l'air au Québec en lien avec la santé, 1975-2009*, Québec, Institut national de santé publique du Québec, [En ligne], ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Institut national de santé publique du Québec, 43 p. [En ligne]. [https://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/1432_BilanQualiteAirQcLienSante1975-2009.pdf].
- KIM, E., P. HOPKE, J. PINTO et W. WILSON, 2005. « Spatial Variability of Fine Particle Mass, Components, and Source Contributions during the Regional Air Pollution Study in St. Louis », *Environmental Science & Technology*, vol. 39, p. 4172-4179.
- KRUDYSZ, M., K. MOORE, M. GELLER, C. SIOUTAS et J. FROINES (2008). « Intra-community spatial variability of particulate matter size distributions in Southern California/Los Angeles », *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 9, p. 1061-1075.
- LABERGE, A. (2020). *Évolution de la qualité de l'air à Shawinigan à la suite de la fermeture de l'aluminerie*, Québec, ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction générale du suivi de l'état de l'environnement, 23 p., [En ligne].
- MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS (MDDEP) (2011). *Inventaire des émissions des principaux contaminants atmosphériques au Québec en 2008 et évolution depuis 1990*, Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 24 p., [En ligne], [<http://www.environnement.gouv.qc.ca/air/inventaire/rapport2008.pdf>].
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MELCC) (2020a). *Caractéristiques du smog*, [En ligne], [<http://www.environnement.gouv.qc.ca/air/info-smog/caracteristiques-smog.htm>].
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MELCC) (2020b). *Feux de forêt*, [En ligne], [<http://www.environnement.gouv.qc.ca/air/feux-foret/index.htm>].
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MELCC) (2020c). *Banque de données sur la qualité de l'air ambiant*, Direction générale du suivi de l'état de l'environnement, [Pour information]. infoair@environnement.gouv.qc.ca.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MELCC) (2020d). *Homogénéisation et calcul des tendances des températures*, [En ligne], [www.environnement.gouv.qc.ca/climat/tendances/homogeneisation.htm#methodecalcul].
- Met One Instrument (2020). « BAM-1020 Continuous Particulate Monitor », [En ligne], [<https://metone.com/wp-content/uploads/2019/10/BAM-1020-4.pdf>].
- PINTO, J., A. LEFOHN et D. SHADWICK (2004). « Spatial Variability of PM_{2.5} in Urban Areas in the United States », *Journal of the Air & Waste Management Association (1995)*, vol. 54, p. 440-449.
- PLAIN, E. (2017). « Patterns of air quality and meteorology in Courtenay B.C. 2011-2016 », [En ligne], Nanaimo, Environmental protection division, 40 p.
- R CORE TEAM (2019). « R: A language and environment for statistical computing », Vienna, Austria, R Foundation for Statistical Computing, [En ligne]. [<https://www.R-project.org/>].

- RESSOURCES NATURELLES CANADA (RNCAN) (2020). *Facteurs ayant des répercussions sur le rendement du carburant*, 3 août 2020, [En ligne], [<https://www.rncan.gc.ca/energie/efficacite/efficacite-energetique-pour-les-transport-et-carburants-de-remplacement/choisir-le-bon-vehicule/conseils-pour-lachat-dun-vehicule-ecoenergetique/facteurs-ayant-des-repercussions-9>].
- SANDRADEWI, J., A. S. H. PRÉVÔT, S. SZIDAT, N. PERRON, M. R. ALFARRA, V. A. LANZ, E. WEINGARTNER et U. BALTENSPERGER (2008). « Using Aerosol Light Absorption Measurements for the Quantitative Determination of Wood Burning and Traffic Emission Contributions to Particulate Matter », *Environmental Science & Technology*, vol. 42(9), p. 3316-3323.
- SEN, P. K. (1968). « Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau », *Journal of the American Statistical Association*, vol. 63(324), p. 1379-1389.
- STATISTIQUE CANADA (2017). *Québec [Région métropolitaine de recensement], Québec et Canada. Profil du recensement, Recensement de 2016, produit n° 98-316-X2016001 au catalogue de Statistique Canada*, 27 février 2020, [En ligne], [<https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2016/dp-pd/prof/index.cfm?Lang=F>].
- WALSH, P., et J.-F. BRIÈRE (2018). *L'incinérateur et la qualité de l'air dans l'arrondissement La Cité-Limoilou à Québec*, Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction générale du suivi de l'état de l'environnement, 46 p., [En ligne], [<http://www.environnement.gouv.qc.ca/air/ambiant/incinerateur/rapport-prog-echantillonnage.pdf>].
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO) (2006). « Air quality guidelines, Global update 2005, Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide », Copenhague, 420 p., [En ligne], [http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf?ua=1].
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO) (2013). « Regional office for Europe. Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP Project Technical Report », 309 p., [En ligne], [http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0004/193108/REVIHAAP-Final-technical-report-final-version.pdf?ua=1].
- WICKHAM, H. (2016). « Ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis », New York, Springer-Verlag.
- ZOTTER, P., H. HERICH, M. GYSEL, I. EL-HADDAD, Y. ZHANG, G. MOČNIK, C. HÜGLIN, U. BALTENSPERGER, S. SZIDAT et A. S. H. PRÉVÔT (2017). « Evaluation of the absorption Ångström exponents for traffic and wood burning in the Aethalometer-based source apportionment using radiocarbon measurements of ambient aerosol », *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 17(6), p. 4229-4249.

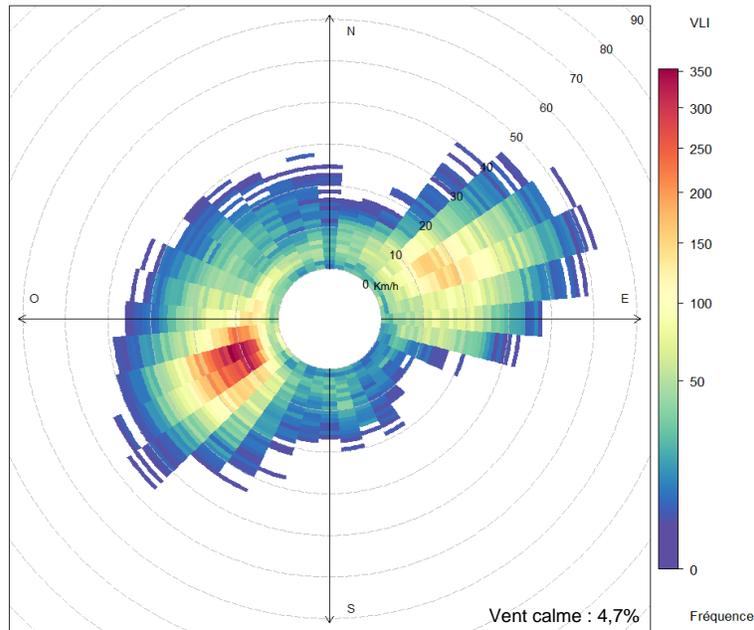
ANNEXES

Annexe A : Statistiques descriptives annuelles des concentrations horaires de particules fines de la région de Québec pour la période de 2010 à 2018

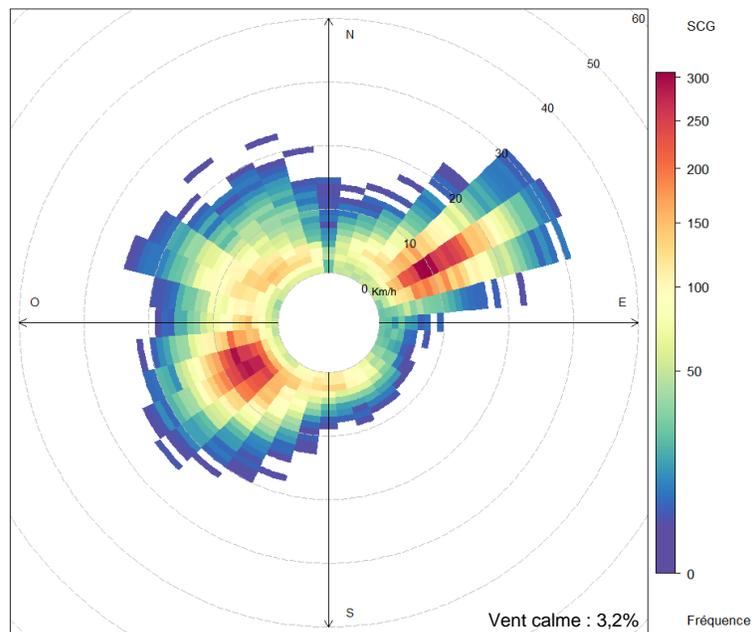
Année	Moyenne	Écart-type	IQR	Centile								n
				2°	10°	25°	50°	75°	95°	98°	100	
Québec – Vieux-Limoilou (VLI)												
2010	10,0	7,8	7	0	3	5	8	12	25	33	104	8093
2011	10,9	7,7	8	1	3	6	9	14	27	33	64	8498
2012	12,4	8,6	9	2	4	7	10	16	29	37	87	8549
2013	10,1	8,7	9	0	2	4	8	13	26	32	129	8548
2014	9,6	7,2	7	0	3	5	8	12	23	30	77	8590
2015	10,4	7,5	7	1	3	6	8	13	25	33	77	8098
2016	9,2	6,4	6	0	3	5	8	11	21	27	66	8275
2017	8,4	6,8	7	0	2	4	7	11	22	27	78	8555
2018	9,1	7,2	8	0	2	4	7	12	23	29	66	8338
2010 à 2018	10,0	7,7	8	0	3	5	8	13	25	32	129	
Québec – École Les Primevères (EPV)												
2010	6,9	6,7	6	0	1	3	5	9	20	27	62	7209
2011	8,3	7,4	8	0	2	3	6	11	23	30	74	8536
2012	8,0	8,8	7	0	1	3	5	10	26	34	104	8621
2013	8,4	8,2	8	0	1	3	6	11	23	31	101	8536
2014	8,4	7,6	8	0	2	3	6	11	23	32	73	8589
2015	7,9	7,4	7	0	2	3	6	10	22	29	71	8605
2016	7,8	7,0	6	0	2	4	6	10	22	29	67	8107
2017	9,0	7,5	7	1	3	4	7	11	23	31	90	8507
2018	8,9	7,4	7	1	2	4	7	11	24	32	61	8380
2010 à 2018	8,2	7,6	7	0	2	3	6	10	23	31	104	
Québec – Collège Saint-Charles-Garnier (CSG)												
2010	9,3	7,6	8	0	2	4	7	12	24	31	68	8164
2011	8,4	6,5	7	0	2	4	7	11	21	27	55	8567
2012	9,9	7,7	7	0	3	5	8	12	25	33	74	8697
2013	10,3	8,3	9	0	2	5	8	14	25	33	108	6138
2014	9,5	6,6	7	0	3	5	8	12	22	28	63	8585
2015	9,1	6,7	6	0	3	5	8	11	22	28	64	8605
2016	7,7	5,8	6	0	2	4	7	10	19	24	48	8223
2017	7,6	5,5	6	0	2	4	6	10	18	23	54	8404
2018	7,5	5,9	6	1	2	4	6	9	19	25	61	8520
2010 à 2018	8,8	6,8	7	0	2	4	7	11	22	28	108	
Deschambault (DEC)												
2010	6,0	5,9	6	0	0	2	5	8	18	23	58	8573
2011	5,7	5,4	6	0	0	2	4	8	17	21	66	8412
2012	7,1	5,6	6	0	2	3	6	9	18	23	49	8361
2013	7,3	5,9	5	0	2	4	6	9	18	22	123	8483
2014	7,7	5,0	6	1	3	4	7	10	18	21	86	8343
2015	6,2	5,0	5	0	1	3	5	8	16	20	45	7887
2016	5,4	4,2	4	0	1	3	5	7	13	17	58	8268
2017	5,8	4,2	5	0	1	3	5	8	14	17	39	8451
2018	6,2	4,3	5	0	2	3	5	8	15	18	36	7913
2010 à 2018	6,4	5,1	5	0	1	3	5	8	16	21	123	

Annexe B : Roses des vents, fréquence de la direction et de la vitesse du vent horaires pour la période 2013 à 2018

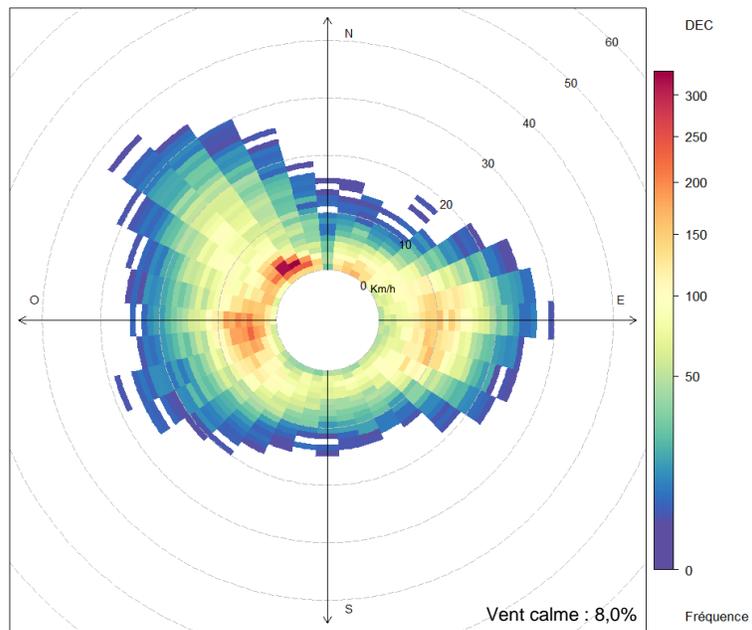
Station climatologique Beauport (ECCC, 2020b; ID climatologique 7010565), associée à la station de qualité de l'air Québec – Vieux-Limoilou



Station Québec – Collège Saint-Charles-Garnier (ID climatologique 7016971), instruments de suivi du climat et de la qualité de l'air sur le même site



Station météorologique Deschambault (ECCC, 2020b; ID climatologique 7011983), associée à la station de qualité de l'air Deschambault

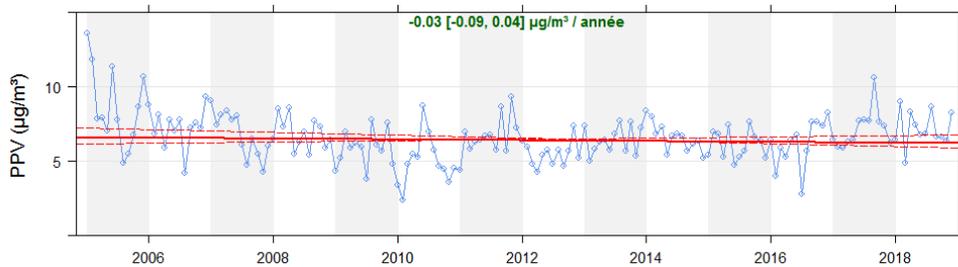


Annexe C : Statistiques descriptives saisonnières des concentrations horaires de particules fines de quatre stations de la région de Québec, pour la période de 2010 à 2018

Saison	Station	Moyenne	Écart-type	IQR	Centile								n
					2°	10°	25°	50°	75°	95°	98°	100°	
Printemps	VLI	8,4	6,3	6	0	2	4	7	10	20	26	78	19157
	EPV	6,5	5,7	5	0	1	3	5	8	18	23	66	19186
	SCG	7,6	5,7	6	0	2	4	6	10	19	24	51	19226
	DEC	5,3	4,1	4	0	1	3	5	7	13	17	66	19057
Été	VLI	10,7	7,5	8	0	3	6	9	14	24	30	129	18614
	EPV	7,9	6,1	7	0	2	4	7	11	19	23	101	18993
	SCG	8,3	6,1	7	0	2	4	7	11	19	23	108	19147
	DEC	7,3	5,7	6	0	2	4	6	10	18	22	123	18996
Automne	VLI	9,1	7,1	8	0	2	4	7	12	23	29	62	19034
	EPV	7,1	6,4	6	0	1	3	5	9	20	26	59	18914
	SCG	8,0	6,2	6	0	2	4	7	10	20	25	74	16744
	DEC	5,7	4,6	5	0	1	3	5	8	15	18	49	18607
Hiver	VLI	11,8	9,1	10	1	4	6	9	16	32	38	87	18739
	EPV	11,4	10,4	12	1	2	4	8	16	33	42	104	17997
	SCG	11,1	8,4	10	0	3	5	9	15	28	35	66	18786
	DEC	7,2	5,7	7	0	1	3	6	10	18	24	58	18031

Annexe D : Tendances des stations EPV et DEC

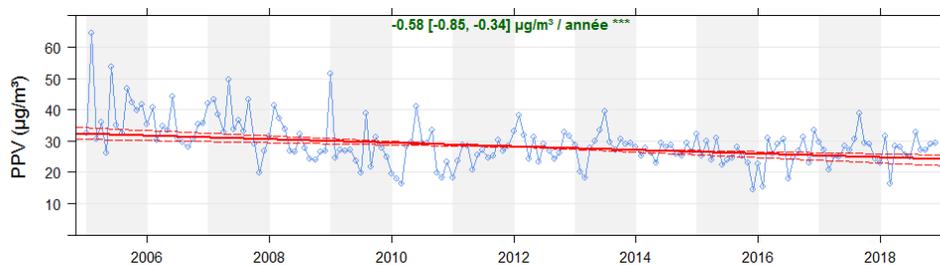
Tendance des concentrations médianes mensuelles de particules fines de la station EPV, pour la période de 2005 à 2018



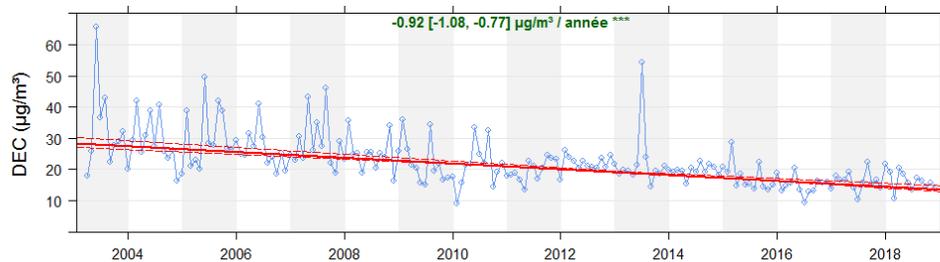
Tendance des concentrations médianes mensuelles de particules fines de la station DEC, pour la période de 2003 à 2018



Tendance des concentrations du 98^e centile mensuel de particules fines de la station EPV, pour la période de 2005 à 2018

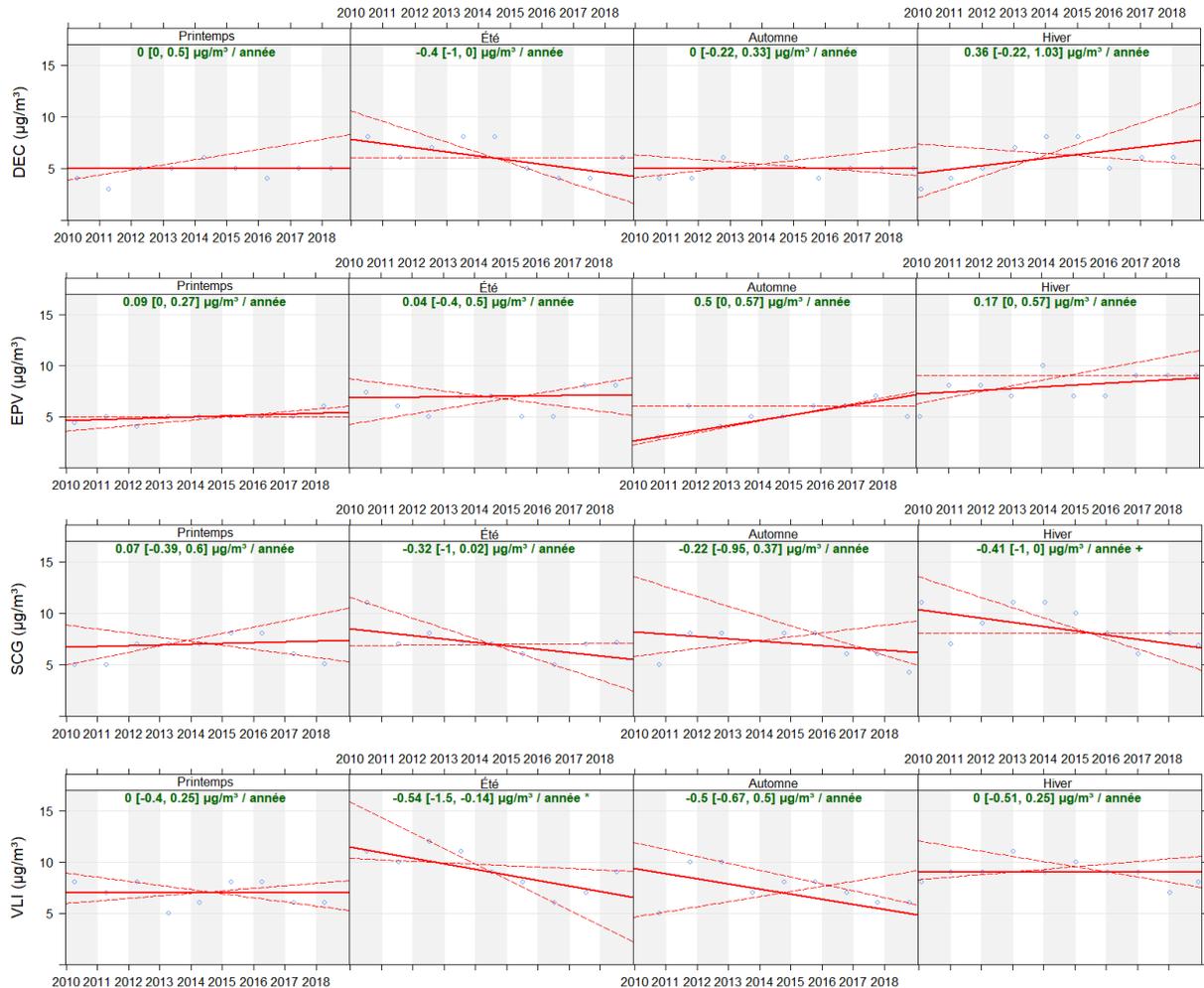


Tendance des concentrations du 98^e centile mensuel de particules fines de la station DEC, pour la période de 2003 à 2018

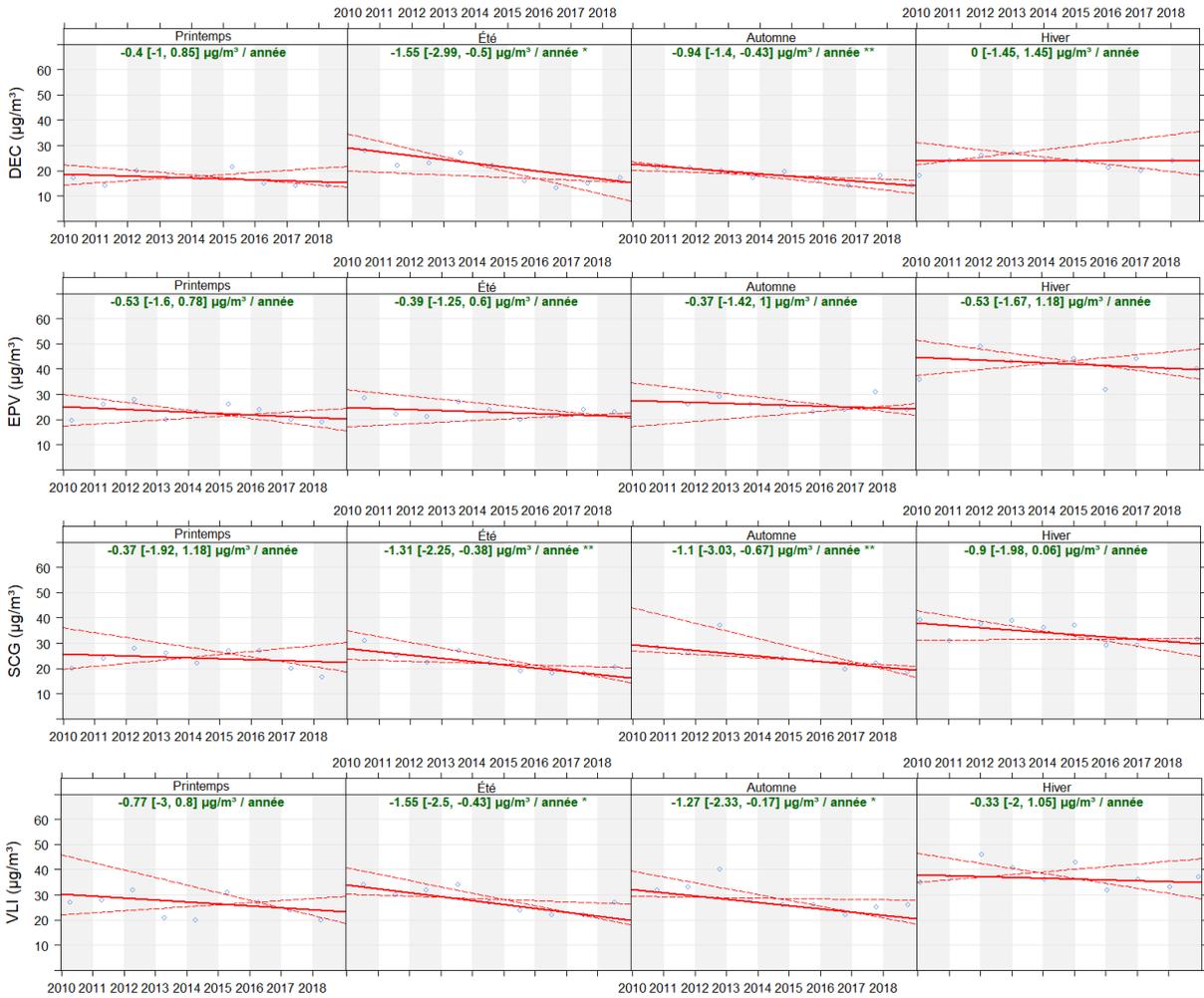


Annexe E : Tendances saisonnières des stations à l'étude pour la période de 2010 à 2018

Médianes des concentrations horaires de particules fines



98^e centile des concentrations horaires de particules fines





**Environnement
et Lutte contre
les changements
climatiques**

Québec 