

# Une analyse statistique entre la concentration de particules fines et d'ozone en présence de brume sèche dans le Sud du Québec

## A statistical analysis between the concentration of fine particulate matter and ozone during hazy conditions in southern Quebec, Canada

Simon Provençal<sup>1</sup>, Richard Leduc<sup>1</sup>, Nathalie Barrette<sup>1</sup>

### Résumé

La proximité du Sud de l'Ontario et du Nord-Est des États-Unis positionne le Québec dans une situation de vulnérabilité face à l'advection de contaminants atmosphériques en provenance de ces régions très industrialisées et peuplées. La visibilité réduite est un indicateur bien connu d'une piètre qualité de l'air lorsque les conditions atmosphériques sont sèches. Lorsque la visibilité est inférieure à 10 km et que l'humidité relative est faible, un épisode de brume sèche est signalé dans l'observation météorologique. Il est donc intuitif d'associer un épisode de brume sèche à un niveau élevé de contaminants atmosphériques. Plusieurs études associent la brume sèche à une concentration élevée d'ozone, et bien que l'ozone soit un gaz qui n'absorbe ni ne disperse la lumière, il est couramment utilisé comme indicateur de visibilité réduite. L'objectif de cette étude est de vérifier si l'ozone est effectivement un indicateur fiable de visibilité réduite au même titre que les particules fines qui, elles, réduisent véritablement la visibilité. À l'aide de données provenant de stations de surveillance météorologique et de qualité de l'air, une analyse statistique est effectuée entre la concentration de ces deux contaminants lorsque la brume sèche est signalée dans les trois régions métropolitaines les plus peuplées du Sud du Québec : Montréal, Québec et Gatineau. Les résultats suggèrent que la concentration de particules fines est élevée lorsque la brume sèche est signalée, mais, par contre, la concentration d'ozone est beaucoup plus variable. Moins de la moitié des observations de brume sèche est accompagnée d'une concentration élevée d'ozone. Les cycles annuels et quotidiens expliquent en partie cette variabilité ; les épisodes de brume sèche estivaux et diurnes sont caractérisés par une concentration élevée d'ozone plus fréquente, contrairement aux épisodes hivernaux, alors qu'à peine quelques observations de brume sèche sont caractérisées ainsi.

### Mots-clés

brume sèche, particules fines, ozone, Québec

(1) Département de géographie, université Laval, Québec, Québec, Canada.

(\*) [simon.provençal.1@ulaval.ca](mailto:simon.provençal.1@ulaval.ca).

### Abstract

Quebec's proximity to southern Ontario and northeastern United States puts it in a vulnerable situation in regards to advection of atmospheric pollutants originating from these highly industrialized and populated regions. Reduced visibility is a well-known indicator of poor air quality when atmospheric conditions are dry. When visibility is reduced to 10 km or less, and relative humidity is low, an episode of haze is reported through the meteorological observation. It is therefore intuitive to link an episode of haze with high levels of atmospheric pollutants. Many studies associate haziness with a high concentration of ozone, and even though ozone isn't a light absorbing or scattering gas, it is often used as an indicator of photochemical pollution and reduced visibility. The purpose of this study is to verify whether or not ozone is indeed a reliable indicator of reduced visibility as much as fine particulate matter, which truly impairs visibility. With data obtained from meteorological and air quality stations, a statistical analysis is performed between the concentrations of those two pollutants when haze is reported in the three most populated metropolitan areas of southern Quebec: Montreal, Quebec City and Gatineau. The results suggest that the concentrations of fine particulate matter is high whenever haze is reported, but the concentration of ozone is much more variable. Fewer than half of total haze observations are accompanied by a high concentration of ozone. Annual and diurnal cycles explain some of this variability; summer and daytime episodes of haze are characterized by a more frequent high concentration of ozone as opposed to winter episodes where only a few observations fit such a description.

### Keywords

haze, fine particulate matter, ozone, Quebec

## Introduction

Le Sud du Québec est localisé à proximité des régions fortement industrialisées et peuplées du Sud de l'Ontario et du Nord-Est des États-Unis. Les activités industrielles et l'urbanisation ont des conséquences négatives sur plusieurs sphères de l'environnement, comme la pollution des terres, de l'eau et de l'air. Le Québec est particulièrement vulnérable quant à l'advection de contaminants atmosphériques provenant du sud, avec le potentiel de détériorer la qualité de son air, bien que le Sud du Québec soit, lui aussi, industrialisé et peuplé et contribue ainsi à polluer son propre air. Les contaminants toxiques de l'air ont de graves effets sur la santé des individus ; ils sont associés à l'occurrence des maladies cardio-vasculaires et respiratoires (Brunekreff et Holgate, 2002). Ils peuvent aussi nuire aux récoltes agricoles (Heck *et al.*, 1982).

La combustion de combustibles fossiles émet des oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ) et des oxydes de soufre ( $\text{SO}_x$ ) dans l'air. Suite à une chaîne de réactions chimiques et de processus physiques, ils peuvent produire des particules fines secondaires ( $\text{PM}_{2,5}$ , particules dont le diamètre est égal ou inférieur à  $2,5 \mu\text{m}$ ), plus spécifiquement surnommées nitrates et sulfates. La combustion de combustibles fossiles et de biomasse libère aussi des  $\text{PM}_{2,5}$  sous forme de particules carbonées. D'autres espèces chimiques se retrouvent dans les  $\text{PM}_{2,5}$ , telles qu'une variété de poussière minérale, mais les nitrates, les sulfates et les particules carbonées constituent la majeure partie de la concentration massique des  $\text{PM}_{2,5}$  observée à travers le Canada (Brook et Dann, 1999 ; Jeong *et al.*, 2011). En présence de composés organiques volatils, les  $\text{NO}_x$  peuvent aussi pro-

duire de l'ozone ( $\text{O}_3$ ). Dans le passé, les  $\text{PM}_{2,5}$  et l' $\text{O}_3$  étaient alors traités comme des problèmes de pollution indépendants l'un de l'autre, mais il existe bien un couplage chimique entre les deux (Meng *et al.*, 1997).

Plusieurs études argumentent que l'advection de tels contaminants des États-Unis mène à des épisodes de pollution atmosphérique au Québec (Thibault *et al.*, 1995 ; Leduc et Roy-Loubier, 2005) et ailleurs au Canada (Munn, 1973 ; Vickers et Munn, 1977 ; Chung, 1977 ; 1978 ; Thurston *et al.*, 1994 ; Brook *et al.*, 2002). L'advection de contaminants en provenance de l'Ontario impacte aussi le Québec (Leduc et Roy-Loubier, 2005). Une caractéristique géographique importante du Sud du Québec est la vallée du fleuve Saint-Laurent dont la topographie emprisonne les contaminants en provenant du sud et les canalise le long du fleuve. Plusieurs villes se retrouvent sur ses rives, notamment Montréal, Trois-Rivières et Québec.

Lorsque la concentration de contaminants atmosphériques est élevée, il est possible que la visibilité soit réduite. Si l'humidité relative est faible, il est d'usage de penser qu'une visibilité réduite est un indicateur de mauvaise qualité de l'air. Les standards canadiens prescrivent une observation de brume sèche lorsque la visibilité est inférieure à 10 km et que l'humidité relative est faible (Vickers et Munn, 1977 ; Environnement Canada, 2015). Donc il est intuitif d'associer un épisode de brume sèche à une concentration élevée de contaminants atmosphériques. Toutes les espèces de particules en suspension réduisent la visibilité, mais d'après des données provenant de stations de surveillance à travers le Canada, les sulfates et les nitrates contribuent particulièrement à obstruer la visibilité (McDonald et Shepherd, 2004).

Leduc et Pépin (1995) ont analysé l'évolution des observations de brume sèche dans plusieurs villes du corridor Windsor-Québec entre 1953 et 1990. Ils ont observé une fréquence maximale à London (Ontario) qui diminue progressivement jusqu'à Sept-Îles (Québec). Dans le même article, ils ont brièvement analysé le lien entre l'occurrence de brume sèche et la concentration d'O<sub>3</sub> à Montréal entre 1979 et 1990 à l'aide d'un tableau de fréquences simple. Ils ont conclu que la fréquence de brume sèche est plus élevée lorsque la concentration d'O<sub>3</sub> est élevée elle aussi. Lorsqu'ils ont publié cet article, les PM<sub>2,5</sub> n'étaient pas mesurées au Québec. À cette époque, l'ozone était alors utilisé comme indicateur de pollution photochimique et de visibilité réduite, bien que n'ayant aucun impact sur la visibilité. Des études de cas d'épisodes estivaux de brume sèche associent la brume sèche (ou la visibilité réduite) à de fortes concentrations d'ozone (Wolff *et al.*, 1981 ; 1982 ; King et Vukovich, 1982 ; Diederer *et al.*, 1985 ; Aneja *et al.*, 2004 ; Taubman *et al.*, 2004). Une concentration élevée d'ozone a aussi été observée dans la brume sèche arctique (Herbert *et al.*, 1989) et dans la fumée de feux de forêt (Radke *et al.*, 1978 ; Stith *et al.*, 1981 ; Delany *et al.*, 1985 ; Andreae *et al.*, 1988).

Il est important de noter que la composition chimique de la brume sèche peut différer et que celle-ci affecte la production d'ozone. Toutes les formes de combustion (charbon, mazout, gaz naturel, pétrole, biomasse, etc.) produisent des oxydes d'azote. En présence de composés organiques volatils, les oxydes d'azote sont très efficaces pour produire de l'ozone suite à une série de réactions photochimiques complexe. C'est pour cette raison que la brume sèche issue de ces formes de combustion est communément surnommée le smog photochimique. Quant aux dérivés soufrés, ils sont produits principalement par la combustion de charbon. C'est pour cette raison que la brume sèche issue de cette forme de combustion est communément surnommée le smog industriel. Les sulfates sont cependant beaucoup moins efficaces que les oxydes d'azote pour produire de l'ozone. Il n'est donc pas prévu que le smog industriel soit nécessairement accompagné d'une forte concentration d'ozone. Au Québec, le charbon représente à peine 1 % de la consommation totale d'énergie ; le pétrole (38 %) et le gaz naturel (14 %), les hydrocarbures sont des sources d'énergie beaucoup plus importantes (Gouvernement du Québec, <http://hydrocarbures.gouv.qc.ca/consommation.asp>). La brume sèche observée au Québec et issue de sources de pollution québécoises serait donc davantage de nature photochimique et propice à la formation d'ozone. Elle peut néanmoins être de nature industrielle et présenter donc une faible concentration d'ozone en raison des sources de pollution provenant de l'Ontario et des États-Unis, qui sont des régions où la consommation de charbon est plus importante.

L'objectif de cette étude est de vérifier, à l'aide de données récentes, si l'ozone est effectivement un indicateur fiable de visibilité réduite, au même titre que les PM<sub>2,5</sub> dont les données sont maintenant disponibles. Ceci est effectué en analysant des données météorologiques et de qualité de l'air dans les trois régions métropolitaines (les régions métropolitaines seront désormais référées simplement comme des « villes ») les plus peuplées du Sud du Québec : Montréal, Québec et Gatineau.

## 1. Méthodologie

Cette analyse est effectuée dans les trois villes les plus peuplées du Québec. Dans chacune d'elles, une station météorologique est choisie pour obtenir les observations horaires de brume sèche, signalée ou non. Une station de la qualité de l'air est aussi choisie pour obtenir les observations horaires de PM<sub>2,5</sub> et d'O<sub>3</sub>. Un certain effort a été déployé pour choisir une station située loin du centre-ville et de sources de pollution qui pourraient influencer les données à petite échelle, mais qui contient une série de données substantielle. Les trois villes sont les suivantes :

- Montréal, avec une population métropolitaine de 4 millions d'habitants, qui constitue près de la moitié de la population totale du Québec. Elle est localisée au creux de la vallée du fleuve Saint-Laurent, à 50 km de la frontière des États-Unis et à 60 km de la frontière de l'Ontario. La station météorologique choisie est à l'aéroport Pierre-Elliott-Trudeau, qui surveille les conditions météorologiques à Montréal depuis plusieurs décennies. La station de la qualité de l'air choisie est à Sainte-Anne-de-Bellevue, située dans une banlieue dans l'Ouest de l'île de Montréal. Cette station mesure les PM<sub>2,5</sub> et les O<sub>3</sub> depuis 1997.
- Québec a une population métropolitaine de 800 000 habitants. Elle est située à 230 km en aval de Montréal, donc plus loin des États-Unis et de l'Ontario que Montréal. Le choix d'une station de la qualité de l'air s'est arrêté sur la station Saint-Charles-Garnier qui mesure les deux contaminants depuis 2003, bien que la station des Sables soit opérationnelle depuis 1998 mais située près du centre-ville et du port de Québec. Les données météorologiques proviennent de l'aéroport Jean-Lesage.
- Gatineau a une population de 275 000 habitants. Cependant, elle fait partie de la région métropolitaine d'Ottawa en Ontario, qui compte une population de 1,3 million d'habitants. Elle est située à 170 km à l'ouest de Montréal, directement sur la frontière ontarienne, et à 75 km de la frontière des États-Unis. La station de la qualité de l'air située dans le secteur Hull est utilisée, elle est en fonction depuis

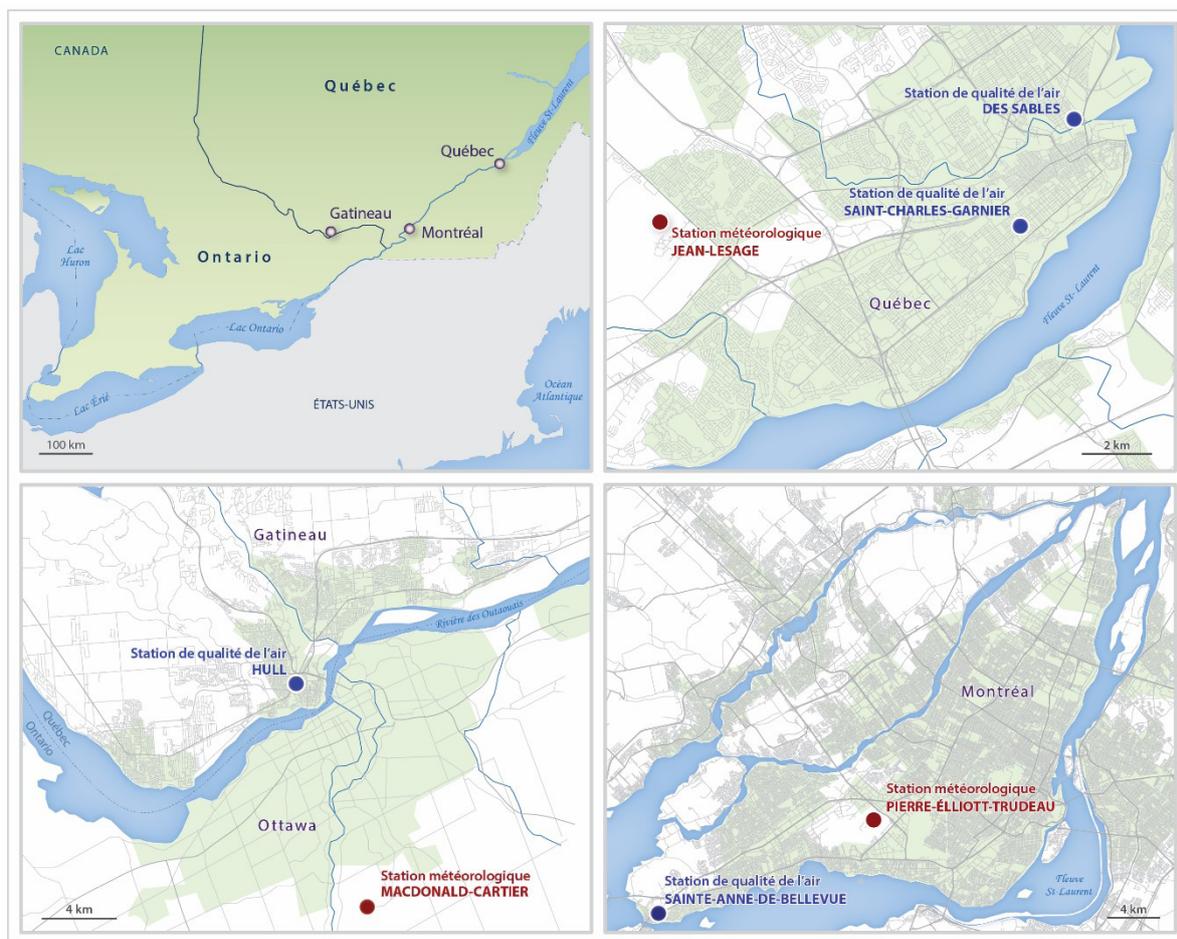


Figure 1. Carte du Sud du Québec (supérieur gauche) et localisation des stations météorologiques et de qualité de l'air à Québec (supérieur droit), Gatineau (inférieur gauche) et Montréal (inférieur droit).

*Map of southern Quebec (top left) and location of the meteorological and air quality stations in Québec City (top right), Gatineau (bottom left) and Montréal (bottom right).*

2003. Les données météorologiques proviennent de l'aéroport Macdonald-Cartier à Ottawa.

Les données de population référencées dans le paragraphe précédent proviennent de Brinkhoff (City Population, <http://www.citypopulation.de>). Une carte des trois villes avec la localisation des stations d'observation est tracée dans la figure 1.

Une analyse différente est effectuée dans chaque ville. La période d'étude dépend de la disponibilité des données : 1997-2013 pour Montréal, 2003-2013 pour Québec et 2003-2013 pour Gatineau.

Occasionnellement, il arrive qu'une observation de brume sèche soit signalée lorsque l'humidité relative est trop élevée pour la justifier. Afin d'éviter tout doute, un critère est appliqué lorsque la brume sèche est signalée. Ce critère est le même qu'ont utilisé Leduc et Pépin (1995) :  $T - T_r > 2^\circ\text{C}$ , où  $T$  est la température

de l'air et  $T_r$  est la température du point de rosée. Si une observation de brume sèche est signalée lorsque les conditions ambiantes ne satisfont pas cette condition, cette observation est exclue. L'observation est aussi exclue si la valeur de  $T$  ou de  $T_r$  est manquante.

Pour chacun des contaminants ( $\text{PM}_{2.5}$  et  $\text{O}_3$ ), et dans chacune des trois villes, la série de données de la concentration est séparée en déciles, pour former dix classes de concentration équiprobables. Le premier et le dernier décile, ainsi que d'autres statistiques, sont présentés dans le tableau 1.

Tout au long de ce texte, nous faisons référence à une concentration faible pour toute concentration dont la valeur fait partie de la première classe (premiers 10 %), et à une concentration élevée pour toute concentration dont la valeur fait partie de la dernière classe (derniers 10 %). Ensuite, lorsque la brume sèche

Tableau 1. Statistiques des concentrations de PM<sub>2.5</sub> et d'O<sub>3</sub> à Montréal, Québec et Gatineau jusqu'en 2013. Bien que la surveillance de l'O<sub>3</sub> ait commencé en 2000 à Québec, seulement les données à partir du 1er avril 2003 ont été utilisées pour calculer ces statistiques.

**Table 1. PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> concentration statistics in Montreal, Quebec City and Gatineau until 2013. Although the monitoring of O<sub>3</sub> started in 2000 in Quebec City, only data starting from April 1st 2003 were used to calculate these statistics.**

	Montréal		Québec		Gatineau	
	PM <sub>2.5</sub>	O <sub>3</sub>	PM <sub>2.5</sub>	O <sub>3</sub>	PM <sub>2.5</sub>	O <sub>3</sub>
Début des observations	8/10/1997	19/09/1997	4/04/2003	7/09/2000	15/04/2003	1/01/2003
Moyenne	7,69 µg/m <sup>3</sup>	24,00 ppb	8,09 µg/m <sup>3</sup>	22,84 ppb	6,99 µg/m <sup>3</sup>	23,54 ppb
Écart type	8,01 µg/m <sup>3</sup>	14,07 ppb	7,54 µg/m <sup>3</sup>	12,35 ppb	6,88 µg/m <sup>3</sup>	13,16 ppb
1 <sup>er</sup> décile	0,85 µg/m <sup>3</sup>	4,80 ppb	1,27 µg/m <sup>3</sup>	5,59 ppb	0,88 µg/m <sup>3</sup>	5,71 ppb
Médiane	5,45 µg/m <sup>3</sup>	23,80 ppb	6,00 µg/m <sup>3</sup>	23,08 ppb	5,00 µg/m <sup>3</sup>	23,32 ppb
9 <sup>e</sup> décile	17,18 µg/m <sup>3</sup>	41,80 ppb	17,00 µg/m <sup>3</sup>	52,62 ppb	15,40 µg/m <sup>3</sup>	40,01 ppb
Échantillon	135 146	138 967	87 799	87 125	89 675	89 818

est signalée, les données horaires de la concentration des contaminants sont réparties en fonction des classes de concentration des PM<sub>2.5</sub> et de l'ozone. Les tableaux incluent une classe de concentration faible, une classe de concentration élevée, et deux classes de concentration intermédiaires sont séparées par la médiane. Si la valeur de concentration d'un des deux contaminants est manquante pour une observation spécifique de brume sèche, cette observation ne peut être prise en compte. Malheureusement, des données de qualité de l'air sont souvent manquantes en raison de la calibration fréquente et de la déficience des instruments de mesure.

## 2. Résultats

L'analyse pour Montréal est effectuée entre 1997 et 2013. Au cours de cette période de 17 ans, 1 479 observations horaires de brume sèche ont été signalées ; 272 d'entre elles ont été exclues puisqu'elles ne satisfont pas aux critères retenus. Les observations restantes sont réparties dans le tableau 2 en fonction de leur concentration en PM<sub>2.5</sub> et O<sub>3</sub>. Une grande majorité (> 80 %) de ces observations se produit lorsque la concentration des PM<sub>2.5</sub> est élevée, alors la classe de concentration faible enregistre une fréquence négligeable (< 1 %). La situation pour la concentration d'ozone est bien différente : à peine 25 % des observations se produisent lorsque la concentration est élevée. En fait, 12 % d'entre elles se produisent lorsque la concentration est faible.

L'analyse pour Québec est effectuée entre 2003 et 2013. Au cours de cette période de 11 ans, 382 observations horaires de brume sèche ont été signalées, 56 d'entre elles ont été exclues puisqu'elles ne satisfont pas aux critères retenus. Les observations restantes sont réparties dans le tableau 2. Comme à Montréal, la totalité des observations se produit lorsque la concentration des PM<sub>2.5</sub> est élevée. En revanche, 74 % des observations de cette classe ont une concentration d'O<sub>3</sub> supérieure à la médiane.

L'analyse pour Gatineau est effectuée entre 2003 et 2013. Au cours de cette période de 11 ans, 441 observations horaires de brume sèche ont été signalées, 73 d'entre elles ont été exclues puisqu'elles ne satisfont pas aux critères retenus. Les observations restantes sont réparties dans le tableau 2. La situation à Gatineau est semblable à celle de Québec : une grande majorité des observations se retrouve dans la classe de concentration élevée de PM<sub>2.5</sub>, 41 % d'entre elles se produisent au niveau élevé de concentration d'ozone, et 70 % d'entre elles ont une concentration d'ozone supérieure à la médiane.

Ces analyses démontrent, d'une part, le résultat peu surprenant que la concentration de PM<sub>2.5</sub> est généralement élevée lors d'épisodes de brume sèche, et d'autre part, le résultat plus intéressant que la concentration d'ozone est plus faible que prévu : plus d'une observation sur deux à Québec et Gatineau, et trois observations sur quatre à Montréal. Il est bien connu que la qualité de l'air manifeste un

Tableau 2. Distribution des observations de brume sèche en fonction de la concentration de  $PM_{2,5}$  et d' $O_3$ .  
**Table 2. Distribution of observations of haze according to the concentration of  $PM_{2,5}$  and  $O_3$ .**

Montréal		$O_3$ (ppb)				Total
		[0, 4,80[	[4,80, 23,80[	[23,80, 41,80[	[41,80, ∞[	
$PM_{2,5}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	[0, 0,85[	0	3	2	0	5 (0,4%)
	[0,85, 5,45[	0	9	1	1	11 (0,9%)
	[5,45, 17,18[	30	110	40	12	192 (15,9%)
	[17,18, ∞[	119	333	255	292	999 (82,8%)
	Total	149 (12,3%)	455 (37,7%)	298 (24,7%)	305 (25,3%)	1 207
Québec		$O_3$ (ppb)				Total
		[0, 5,59[	[5,59, 23,08[	[23,08, 52,62[	[52,62, ∞[	
$PM_{2,5}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	[0, 1,27[	0	0	0	0	0 (0,0%)
	[1,27, 6,00[	0	3	1	0	4 (1,2%)
	[6,00, 17,00[	1	15	23	10	49 (15,0%)
	[17,00, ∞[	10	56	75	132	273 (83,7%)
	Total	11 (3,4%)	74 (22,7%)	99 (30,4%)	142 (43,6%)	326
Gatineau		$O_3$ (ppb)				Total
		[0, 5,71[	[5,71, 23,32[	[23,32, 40,01[	[40,01, ∞[	
$PM_{2,5}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	[0, 0,88[	0	0	0	0	0 (0,0%)
	[0,88, 5,00[	0	0	0	0	0 (0,0%)
	[5,00, 15,40[	5	23	18	15	61 (16,6%)
	[15,40, ∞[	16	68	87	136	307 (83,4%)
	Total	21 (5,7%)	91 (24,7%)	105 (28,5%)	151 (41,0%)	368

Tableau 3. Distribution des observations estivales (juin, juillet et août) de brume sèche en fonction de la concentration de  $PM_{2,5}$  et d' $O_3$ .  
**Table 3. Distribution of summertime (June, July and August) observations of haze according to the concentration of  $PM_{2,5}$  and  $O_3$ .**

Montréal		$O_3$ (ppb)				Total
		[0, 4,80[	[4,80, 23,80[	[23,80, 41,80[	[41,80, ∞[	
$PM_{2,5}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	[0, 0,85[	0	0	0	0	0 (0,0%)
	[0,85, 5,45[	0	1	1	1	3 (0,6%)
	[5,45, 17,18[	1	19	21	7	48 (9,6%)
	[17,18, ∞[	5	70	145	229	449 (89,8%)
	Total	6 (1,2%)	90 (18,0%)	167 (33,4%)	237 (47,4%)	500
Québec		$O_3$ (ppb)				Total
		[0, 5,59[	[5,59, 23,08[	[23,08, 52,62[	[52,62, ∞[	
$PM_{2,5}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	[0, 1,27[	0	0	0	0	0 (0,0%)
	[1,27, 6,00[	0	3	1	0	4 (1,6%)
	[6,00, 17,00[	0	14	19	8	41 (16,6%)
	[17,00, ∞[	2	27	58	115	202 (81,8%)
	Total	2 (0,8%)	44 (17,8%)	78 (31,6%)	123 (49,8%)	247
Gatineau		$O_3$ (ppb)				Total
		[0, 5,71[	[5,71, 23,32[	[23,32, 40,01[	[40,01, ∞[	
$PM_{2,5}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	[0, 0,88[	0	0	0	0	0 (0,0%)
	[0,88, 5,00[	0	0	0	0	0 (0,0%)
	[5,00, 15,40[	2	9	10	15	36 (15,0%)
	[15,40, ∞[	0	31	70	103	204 (85,0%)
	Total	2 (0,8%)	40 (16,7%)	80 (33,3%)	118 (49,2%)	240

cycle quotidien et annuel distinct, ce qui est bien perceptible dans nos données (figures 2 et 3). La plus grande fréquence des observations de brume sèche se produit en juin, juillet et août, à l'exception de Montréal où la fréquence en février est particulièrement élevée. La concentration moyenne mensuelle de  $PM_{2.5}$  est plus élevée au cours des mois d'été et d'hiver, alors que la concentration moyenne mensuelle d'ozone est élevée au cours du printemps et faible au cours de l'automne.

Prenant ceci en considération, le tableau 3, semblable au tableau 2, ne contient que les observations de brume sèche survenues au cours des trois mois d'été (juin, juillet et août).

Comparée au tableau 2, la situation a peu changé pour la concentration de  $PM_{2.5}$  : la classe de concentration élevée enregistre une grande majorité des observations dans les trois villes. La proportion a même augmenté de 7 % à Montréal.

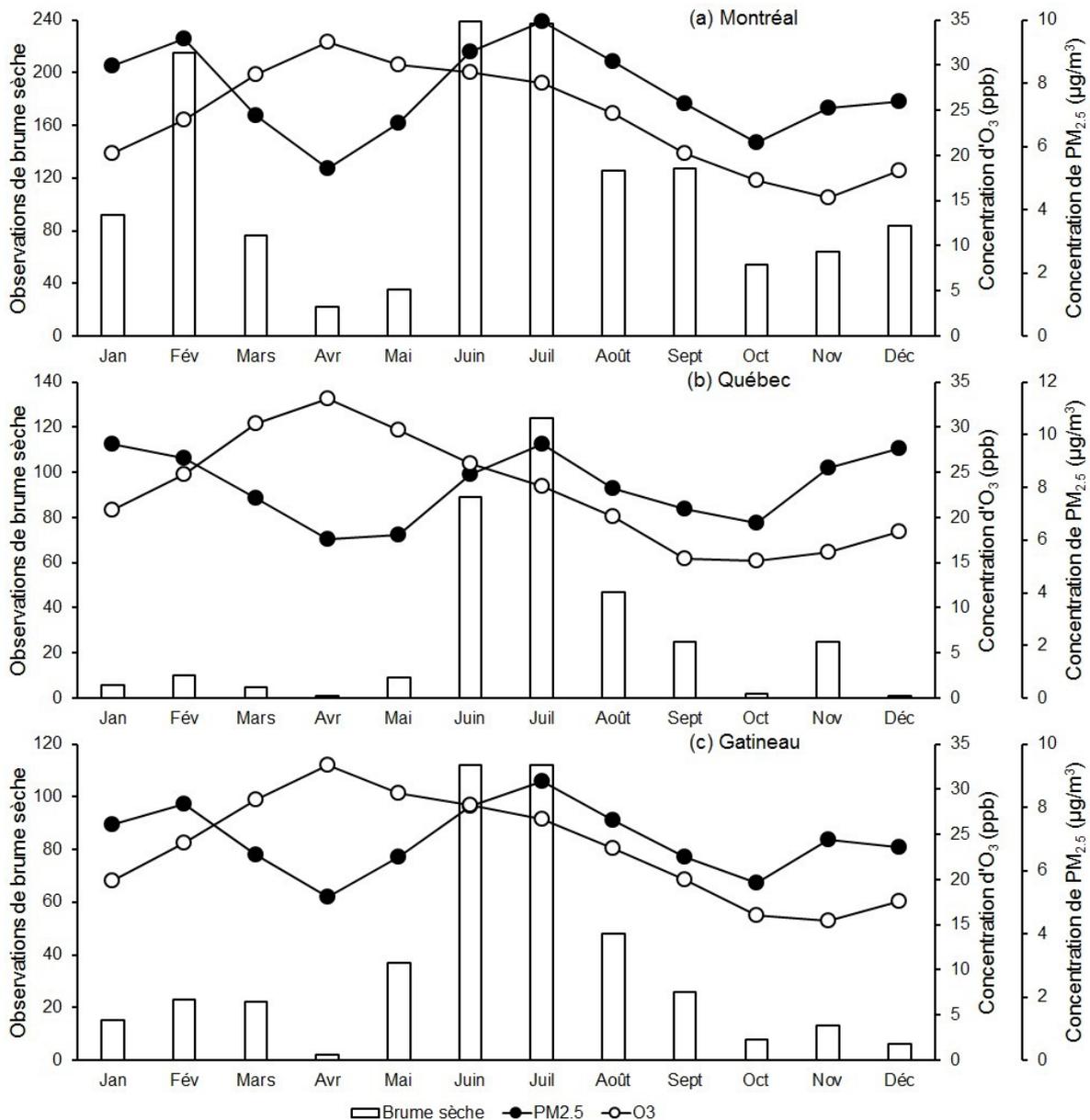


Figure 2. Fréquence mensuelle des observations de brume sèche et concentration moyenne mensuelle de  $PM_{2.5}$  et d' $O_3$  à (a) Montréal entre 1997 et 2013, (b) Québec entre 2003 et 2013, et (c) Gatineau entre 2003 et 2013.

*Monthly frequency of haze observations and monthly averaged  $PM_{2.5}$  and  $O_3$  concentration in (a) Montreal between 1997 and 2013, (b) Quebec City between 2003 and 2013 and (c) Gatineau between 2003 and 2013.*

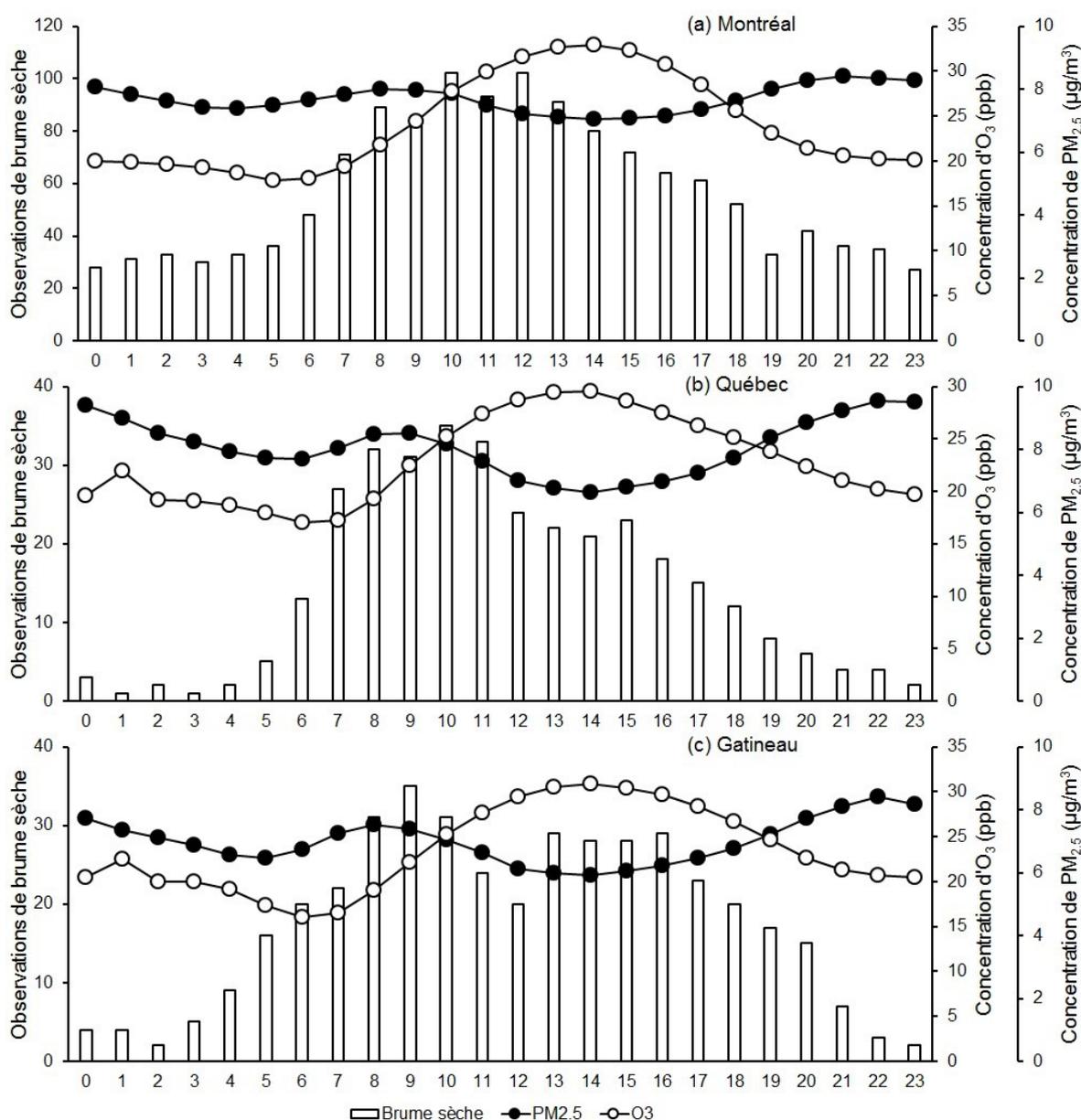


Figure 3. Fréquence horaire des observations de brume sèche et concentration moyenne horaire de  $PM_{2,5}$  et d' $O_3$  à (a) Montréal entre 1997 et 2013, (b) Québec entre 2003 et 2013, et (c) Gatineau entre 2003 et 2013.

*Hourly frequency of haze observations and hourly averaged  $PM_{2,5}$  and  $O_3$  concentration in (a) Montreal between 1997 and 2013, (b) Quebec City between 2003 and 2013 and (c) Gatineau between 2003 and 2013.*

La situation a cependant changé pour la concentration d'ozone : la proportion a augmenté dans la classe de concentration élevée de 22 % à Montréal, 6 % à Québec et 8 % à Gatineau. Bien que plus de 80 % des observations aient une concentration d'ozone supérieure à la médiane dans les trois villes, ces proportions demeurent tout de même inférieures aux attentes. À des fins de comparaison, les observations de brume sèche pour les trois mois d'hiver sont réparties dans le tableau 4 pour Montréal.

La classe de concentration élevée d'ozone compte à peine quelques observations. La situation est similaire à Québec et Gatineau, mais comme la brume sèche est un phénomène beaucoup plus rare en hiver, la fréquence totale au cours de ces trois mois dans ces deux villes est trop faible pour obtenir une représentation significative, et donc n'est pas présentée.

Le cycle quotidien est présenté dans la figure 3. La fréquence des observations de brume sèche est faible entre le coucher et le lever du soleil. Elle augmente

Tableau 4. Distribution des observations hivernales (décembre, janvier et février) de brume sèche en fonction de la concentration de  $PM_{2,5}$  et d' $O_3$  à Montréal.

*Table 4. Distribution of wintertime (January, February and December) observations of haze according to the concentration of  $PM_{2,5}$  and  $O_3$  in Montreal.*

Montréal		$O_3$ (ppb)				Total
		[0, 4,80[	[4,80, 23,80[	[23,80, 41,80[	[41,80, ∞[	
$PM_{2,5}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	[0, 0,85[	0	3	2	0	5 (1,5%)
	[0,85, 5,45[	0	3	0	0	3 (0,9%)
	[5,45, 17,18[	18	43	1	1	63 (18,3%)
	[17,18, ∞[	78	154	38	3	273 (79,4%)
	Total	96 (27,9%)	203 (59,0%)	41 (11,9%)	4 (1,2%)	344

Tableau 5. Distribution des observations diurnes (de 7h à 17h) de brume sèche au cours de l'été (juin, juillet et août) en fonction de la concentration de  $PM_{2,5}$  et d' $O_3$ .

*Table 5. Distribution of daytime (7:00 a.m. to 5:00 p.m.) observations of haze during the summer (June, July and August) according to the concentration of  $PM_{2,5}$  and  $O_3$ .*

Montréal		$O_3$ (ppb)				Total
		[0, 4,80[	[4,80, 23,80[	[23,80, 41,80[	[41,80, ∞[	
$PM_{2,5}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	[0, 0,85[	0	0	0	0	0 (0,0%)
	[0,85, 5,45[	0	0	0	1	1 (0,3%)
	[5,45, 17,18[	0	8	13	7	28 (9,4%)
	[17,18, ∞[	1	30	89	154	274 (90,4%)
	Total	1 (0,3%)	38 (12,5%)	102 (33,7%)	162 (53,5%)	303
Québec		$O_3$ (ppb)				Total
		[0, 5,59[	[5,59, 23,08[	[23,08, 52,62[	[52,62, ∞[	
$PM_{2,5}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	[0, 1,27[	0	0	0	0	0 (0,0%)
	[1,27, 6,00[	0	3	1	0	4 (2,0%)
	[6,00, 17,00[	0	12	16	7	35 (17,2%)
	[17,00, ∞[	1	14	44	105	164 (80,8%)
	Total	1 (0,5%)	29 (14,3%)	61 (30,1%)	112 (55,2%)	203
Gatineau		$O_3$ (ppb)				Total
		[0, 5,71[	[5,71, 23,32[	[23,32, 40,01[	[40,01, ∞[	
$PM_{2,5}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	[0, 0,88[	0	0	0	0	0 (0,0%)
	[0,88, 5,00[	0	0	0	0	0 (0,0%)
	[5,00, 15,40[	2	6	8	11	27 (15,9%)
	[15,40, ∞[	0	18	50	75	143 (84,1%)
	Total	2 (1,2%)	24 (14,1%)	58 (34,1%)	86 (50,6%)	170

tôt le matin pour atteindre un maximum avant midi, et diminue progressivement au cours de l'après-midi et de la soirée. La concentration moyenne quotidienne maximale de  $PM_{2,5}$  est observée en matinée et en soirée. La concentration moyenne quotidienne maximale d'ozone est observée tôt dans l'après-midi alors que le minimum se produit en matinée. La calibration de certains instruments de mesure est effectuée quotidiennement à 1 heure, ce qui occasionne une perte

de données fréquente à cette heure. L'échantillon est donc beaucoup plus faible à cette heure comparativement aux autres périodes de la journée, ce qui explique la moyenne particulière obtenue à Québec et Gatineau à 1 heure. Le tableau 5 cerne les épisodes estivaux et diurnes (entre 7h et 17h) de brume sèche. La proportion pour la classe de concentration élevée d' $O_3$  a encore augmenté, mais modestement, de 6 % à Montréal, 5 % à Québec et 1 % à Gatineau.

Finalement, afin d'obtenir des indices sur l'origine et la nature des épisodes de brume sèche, la figure 4 illustre la proportion des observations de brume sèche en fonction de la direction du vent.

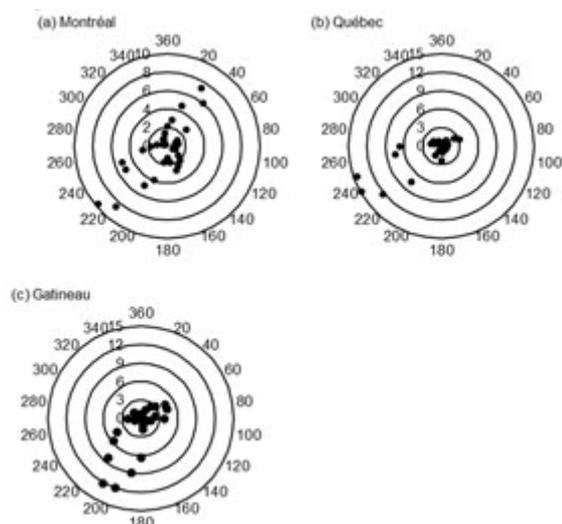


Figure 4. Proportion (en %) des observations horaires de brume sèche en fonction de la direction du vent (en degrés) à (a) Montréal entre 1997 et 2013, (b) Québec entre 2003 et 2013, et (c) Gatineau entre 2003 et 2013.

**Proportion (in%) of hourly haze observations according to wind direction (in degrees) in (a) Montreal between 1997 and 2013, (b) Quebec City between 2003 and 2013, and (c) Gatineau between 2003 and 2013.**

À Montréal, 58 % des observations se produisent lorsque le vent souffle du sud-est, sud, sud-ouest ou de l'ouest (entre 100 et 270 °), ce qui suggère que ces sources de pollution proviennent principalement de l'Ontario et des États-Unis. De plus, 27 % des observations surviennent lorsque le vent souffle du nord-est (entre 10 et 80 °), en provenance de Québec. Montréal est la source de ses propres épisodes de brume sèche dans 6 % des cas, lorsque le vent est calme. Montréal, l'Ontario et les États-Unis sont la source apparente de la grande majorité (69 %) des observations de brume sèche à Québec (direction du vent entre 180 et 270 °), alors que 8 % de celles-ci se produisent en condition de vent calme. À Gatineau, 67 % des observations sont accompagnées d'un vent provenant du sud-est, sud ou sud-ouest (entre 110 et 260 ° ; provenant de l'Ontario et des États-Unis), et 23 % d'entre elles surviennent lorsque le vent souffle du nord-est ou de l'est (entre 10 et 90 °, provenant de Montréal et Québec). À peine 2 % des observations surviennent lorsque le vent est calme.

### 3. Discussion et conclusion

Nous avons tenté de vérifier si l'ozone est un indicateur fiable de visibilité réduite en analysant des données de qualité de l'air lorsqu'une observation de brume sèche est signalée dans trois villes du Sud du Québec. Dans toutes les localités, la concentration de  $PM_{2.5}$  est élevée lors d'au moins 8 observations de brume sèche sur 10. Étant donné que les particules en suspension constituent un obstacle à la visibilité, ceci est un constat anodin. Lors d'épisodes de brume sèche, la concentration d'ozone a tendance à être plus élevée, mais elle est beaucoup plus variable. La classe de concentration élevée enregistre une proportion appréciable (et supérieure à 10 %), mais plus de la moitié des observations se retrouve à l'extérieur de cette classe. Il est effectivement fréquent que la brume sèche soit accompagnée d'une concentration d'ozone faible.

Après avoir séparé les observations en fonction de la période de l'année et de la journée, ces variables ont démontré clairement le rôle important qu'elles exercent sur la distribution de la concentration d'ozone. Pendant l'été et pendant la journée, la proportion des observations de brume sèche accompagnées d'une concentration élevée d'ozone a augmenté substantiellement, mais pas au même niveau que celui atteint par les  $PM_{2.5}$ . L' $O_3$  étant le produit de réactions photochimiques, ceci démontre à quel point le manque d'ensoleillement en hiver et pendant la nuit limite la production d'ozone, en dépit de la présence abondante de  $PM_{2.5}$ . Les épisodes estivaux et diurnes de brume sèche ont effectivement la plus grande chance d'être accompagnés d'une concentration élevée d'ozone. Ceci est cohérent avec les résultats de plusieurs études urbaines qui observent une forte corrélation positive entre la concentration d'ozone et la température (Korsog et Wolff, 1991 ; Sillman et Samson, 1995 ; Pugliese *et al.*, 2014), particulièrement lorsqu'elle est supérieure à 20 °C (Camalier *et al.*, 2007). La raison pour laquelle la proportion de la classe de concentration élevée d'ozone dans le tableau 2 est beaucoup plus faible à Montréal que dans les deux autres villes est la fréquence plus élevée de brume sèche hivernale. La saisonnalité exerce peu d'influence sur la concentration des  $PM_{2.5}$  lorsque la brume sèche est présente.

Bien que la concentration d'ozone soit généralement plus élevée lorsque la brume sèche est présente, elle n'est pas un indicateur robuste de visibilité réduite dans le Sud du Québec. Elle est plus fiable lors d'épisodes de brume sèche estivaux et diurnes, mais les  $PM_{2.5}$  demeurent un meilleur indicateur dans la plupart des cas. L'ozone n'est pas du tout un bon indicateur de visibilité réduite lors d'épisodes de brume sèche hivernaux.

L'analyse de l'origine des épisodes de brume sèche permet de penser que le Québec contribue, par lui-même, à la formation d'une minorité des épisodes de brume sèche, tandis que l'Ontario et les États-Unis contribuent à la formation d'une proportion beaucoup plus importante d'épisodes. Les sources de pollution ontariennes et américaines, propices à la formation de smog industriel, peuvent expliquer, du moins en partie, les épisodes de brume sèche présentant une faible concentration d'ozone observés en territoire

québécois. Mais comme ces mêmes sources de pollution sont aussi propices à la formation de smog photochimique, cette explication demeure spéculative.

*Nous sommes reconnaissants envers Environnement Canada pour avoir fourni les données météorologiques et le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques pour avoir fourni les données de la qualité de l'air.*

### Références bibliographiques

Andreae MO, Browell EV, Garstang M *et al.* (1988). Biomass-burning emissions and associated haze layers over Amazonia, *Journal of Geophysical Research*, n° 93, p. 1509-1527.

Aneja VP, Brittig JS, Kim DS *et al.* (2004). Ozone and other air quality-related variables affecting visibility in the Southeast United States, *Journal of the Air & Waste Management Association*, n° 54, p. 681-688.

Brook JR et Dann TF. (1999). Contribution of nitrate and carbonaceous species to PM<sub>2.5</sub> observed in Canadian cities, *Journal of the Air & Waste Management Association*, n° 49, p. 193-199.

Brook JR, Lillyman CD, Shepherd MF *et al.* (2002). Regional transport and urban contributions to fine particle concentrations in Southeastern Canada, *Journal of the Air & Waste Management Association*, n° 52, p. 855-866.

Brunekreff B, Holgate ST. (2002). Air pollution and health, *The Lancet*, n° 360, p. 1233-1242.

Camalier L, Cox W, Dolwick P. (2007). The effects of meteorology on ozone in urban areas and their use in assessing ozone trends, *Atmospheric Environment*, n° 41, p. 7127-7137.

Chung YS. (1977). Ground-level ozone and regional transport of air pollutants, *Journal of Applied Meteorology*, n° 16, p. 1127-1136.

Chung YS. (1978). The distribution of atmospheric sulphates in Canada and its relationship to long-range transport of air pollutants, *Atmospheric Environment*, n° 12, p. 1471-1480.

Delany AC, Haagensen P, Walters S *et al.* (1985). Photochemically produced ozone in the emission from large-scale tropical vegetation fires, *Journal of Geophysical Research*, n° 90, p. 2425-2429.

Diederer HSMA, Guicherit R, Hollander JC. (1985). Visibility reduction by air pollution in the Netherlands, *Atmospheric Environment*, n° 19, p. 377-383.

Environnement Canada. (2015). MANOBS : Manuel d'observations météorologiques, 7e édition, modification 19, p. 477.

Heck WW, Taylor OC, Adams R *et al.* (1982). Assessment of crop loss from ozone, *Journal of the Air Pollution Control Association*, n° 32, p. 353-361.

Herbert GA, Schnell RC, Bridgman HA *et al.* (1989). Meteorology and haze structure during AGASP-II, part 1: Alaskan Arctic flights, 2-10 April 1986, *Journal of Atmospheric Chemistry*, n° 9, p. 17-48.

Jeong CH, McGuire ML, Herod D *et al.* (2011). Receptor model based identification of PM<sub>2.5</sub> sources in Canadian cities, *Atmospheric Pollution Research*, n° 2, p. 158-171.

King WJ, Vukovich FM. (1982). Some dynamic aspects of extended pollution episodes, *Atmospheric Environment*, n° 16, p. 1171-1181.

Korsog PE et Wolff GT. (1991). An examination of urban ozone trends in the northeastern U.S. (1973-1983) using a robust statistical method, *Atmospheric Environment*, n° 25B, p. 47-57.

Leduc R, Pépin L. (1995). Brume sèche dans le corridor Windsor-Québec, *Pollution Atmosphérique*, n° 145, p. 52-59. <http://dx.doi.org/10.4267/pollution-atmospherique.3961>

Leduc R, Roy-Loubier K. (2005). Ozone dans le Sud du Québec : origine et trajectoire, *Vecteur Environnement*, n° 38, p. 44-54.

McDonald K, Shepherd M. (2004). Characterization of visibility impacts related to fine particulate matter in Canada, *Journal of the Air & Waste Management Association*, n° 54, p. 1061-1068.

Meng Z, Dabdub D, Seinfeld JH. (1997). Chemical coupling between atmospheric ozone and particulate matter, *Science*, n° 277, p. 116-119.

Munn RE. (1973). Secular increases in summer haziness in the Atlantic provinces, *Atmosphere*, n° 11, p. 156-161.

Pugliese SC, Murphy JG, Geddes JA *et al.* (2014). The impacts of precursor reduction and meteorology on ground-level ozone in the Greater Toronto area, *Atmospheric Chemistry and Physics*, n° 14, p. 8197-8207.

Radke LF, Stith JL, Hegg JL *et al.* (1978). Airborne studies of particles and gases from forest fires, *Journal of the Air Pollution Control Association*, n° 28, p. 30-34.

Sillman S, Samson PJ. (1995). Impact of temperature on oxidant photochemistry in urban, rural and remote environments, *Journal of Geophysical Research*, n° 100, p. 11497-11508.

Stith JL, Radke LF, Hobbs PV. (1981). Particle emissions and the production of ozone and nitrogen oxides from the burning of forest slash, *Atmospheric Environment*, n° 15, p. 73-82.

Taubman BE, Marufu LT, Piety CA *et al.* (2004). Airborne characterization of the chemical, optical, and meteorological properties, and origins of a combined ozone-haze episode over the eastern United States, *Journal of the Atmospheric Sciences*, n° 61, p. 1781-1793.

Thibault D, Leduc R, Hufty A. (1995). La pollution par l'ozone troposphérique au Québec méridional : analyse des épisodes du 7 et du 17-18 juin 1995, *Vecteur Environnement*, n° 30, p. 34-43.

Thurston GD, Gorczynski JE, Currie JH *et al.* (1994). The nature and origins of acid summer haze air pollution in metropolitan Toronto, Ontario, *Environmental Research*, n° 65, p. 254-270.

Vickers GG, Munn RE. (1977). A Canadian haze climatology, *Climatic Change*, n° 1, p. 97-103.

Wolff GT, Kelly NA, Ferman MA. (1981). On the sources of summertime haze in the eastern United States, *Science*, n° 211, p. 703-705.

Wolff GT, Kelly NA, Ferman MA. (1982). Source regions of summertime ozone and haze episodes in the eastern United States, *Water, Air, and Soil Pollution*, n° 18, p. 65-81.