

Smog et météorologie

Note technique présentée à
Ville de Québec

À l'attention de

Mme Caroline Gates
M. François Innes

Division de la prévention et
du contrôle environnemental
Prévention et qualité du milieu



Par Richard Leduc, Ph. D.

3 avril 2025

Smog et météorologie

Note technique présentée à
Ville de Québec

Graphisme de la première et de la quatrième de couverture : Jacinthe Roy,
Imprimerie de la Baie
Révision linguistique : Chantale Bordeleau, RévisArt

© Richard Leduc, Ph. D., 3 avril 2025

Table des matières

1. MANDAT.....	1
2. INTRODUCTION.....	1
3. MÉTHODOLOGIE.....	2
4. DONNÉES.....	3
4.1 Particules fines.....	3
4.2 Météorologie.....	4
5. MÉTÉOROLOGIE.....	6
6. PARTICULES FINES — BASE HORAIRE.....	7
6.1 Résultats et dépassements des valeurs seuils.....	7
6.2 Moyennes directionnelles horaires.....	12
6.3 Influence des conditions météorologiques — base horaire.....	13
6.4 Caractéristiques des séries horaires.....	15
7. PARTICULES FINES — BASE QUOTIDIENNE.....	18
7.1 Résultats et dépassements des valeurs seuils.....	18
7.2 Influence des conditions météorologiques — base quotidienne.....	20
7.3 Dépassements et smog — exemples.....	21
8. CONCLUSION.....	35
9. RÉFÉRENCES.....	36

Liste des tableaux

Tableau 1. Nombre de concentrations de PM _{2,5} par année et par station	4
Tableau 2. Nombre d'observations météorologiques par année et par station	5
Tableau 3. Statistiques descriptives pour la météorologie.....	6
Tableau 4. Fréquences des directions et vitesses moyennes (km/h).....	6
Tableau 5. Statistiques descriptives PM _{2,5} horaires (µg/m ³)	8
Tableau 6. Résultats annuels PM _{2,5} (µg/m ³)	8
Tableau 7. Fréquence annuelle des dépassements des valeurs seuils à V-Limoilou	9
Tableau 8. Fréquence annuelle des dépassements des valeurs seuils à Primevères	10
Tableau 9. Concentrations moyennes de PM _{2,5} (µg/m ³) à V-Limoilou en fonction de la température (T) et de la vitesse du vent (V)	14
Tableau 10. Concentrations moyennes (µg/m ³) de PM _{2,5} à Primevères en fonction de la température (T) et de la vitesse du vent (V)	14
Tableau 11. Résultats pour les moyennes quotidiennes de PM _{2,5}	18
Tableau 12. Nombre de dépassements des valeurs seuils à V-Limoilou.....	18
Tableau 13. Nombre de dépassements des valeurs seuils à Primevères.....	19
Tableau 14. Répartition des dépassements des valeurs seuils selon le mois	19
Tableau 15. Pourcentage de dépassements des valeurs seuils par saison	20
Tableau 16. Concentrations moyennes quotidiennes (µg/m ³) de PM _{2,5} à V-Limoilou en fonction de la moyenne quotidienne de la température (T) et de la vitesse du vent (V)	21
Tableau 17. Concentrations moyennes quotidiennes (µg/m ³) de PM _{2,5} à Primevères en fonction de la moyenne quotidienne de la température (T) et de la vitesse du vent (V)	21
Tableau 18. Liste des avis de smog	22

Liste des figures

Figure 1. Localisation des stations Vieux-Limoilou et École Primevères.....	4
Figure 2. Illustration des moyennes annuelles de $PM_{2,5}$ ($\mu g/m^3$)	9
Figure 3. Fréquence annuelle des concentrations horaires \geq à $15 \mu g/m^3$	11
Figure 4. Fréquence annuelle des concentrations horaires \geq à $30 \mu g/m^3$	12
Figure 5. Moyennes directionnelles horaires des $PM_{2,5}$ ($\mu g/m^3$) aux deux stations.....	13
Figure 6. Concentrations moyennes ($\mu g/m^3$) de $PM_{2,5}$ à V-Limoilou en fonction de la durée (seuil de $15 \mu g/m^3$, 12 heures et plus).....	15
Figure 7. Concentrations moyennes ($\mu g/m^3$) de $PM_{2,5}$ à V-Limoilou en fonction de la durée (seuil de $30 \mu g/m^3$, 6 heures et plus).....	16
Figure 8. Concentrations moyennes ($\mu g/m^3$) de $PM_{2,5}$ à Primevères en fonction de la durée (seuil de $15 \mu g/m^3$, 12 heures et plus).....	17
Figure 9. Concentrations moyennes ($\mu g/m^3$) de $PM_{2,5}$ à Primevères en fonction de la durée (seuil de $30 \mu g/m^3$, 6 heures et plus).....	17
Figure 10. Radiosondage de Maniwaki le 15 février 2018 12 TUC (metocentre.com)	25
Figure 11. Radiosondage de Maniwaki le 13 décembre 2018 12 TUC (metocentre.com)	26
Figure 12. Radiosondage de Maniwaki le 22 décembre 2019 12 TUC (metocentre.com)	27
Figure 13. Extrait du <i>Journal de Québec</i> du 12 février 2020.....	28
Figure 14. Radiosondage de Maniwaki le 12 février 2020 12 TUC (metocentre.com)	29
Figure 15. Carte de la précipitation et de la pression (niveau moyen de la mer) pour le 25 juin 2023 (ClimateReanalyzer.org).....	30
Figure 16. Carte de la vitesse et de la direction du vent à 10 m pour le 25 juin 2023 (ClimateReanalyzer.org).....	30
Figure 17. Carte en altitude à 700 mb le 24 juin 2023 00 TUC (CMC Environnement Canada)	31
Figure 18. Radiosondage de Maniwaki le 24 juin 2023 00 TUC (metocentre.com)	32
Figure 19. Radiosondage de Maniwaki le 25 juin 2023 12 TUC (metocentre.com)	32
Figure 20. Carte de surface du 6 août 2021 12 TUC (CMC Environnement Canada)	33
Figure 21. Carte en altitude à 500 mb le 7 août 2021 00 TUC (CMC Environnement Canada).....	34
Figure 22. Visibilité réduite par la fumée le 5 août 2021 à l'aéroport Jean-Lesage.....	34

1. MANDAT

Cette note technique fait suite à une demande de la Ville de Québec relativement à un avis technique portant sur les conditions météorologiques propices à une dégradation de la qualité de l'air en ce qui concerne le smog et affectant l'agglomération de Québec.

Étant donné l'ampleur restreinte du mandat, seules les variables météorologiques usuelles et de base seront employées, soit la température et le vent, ainsi que des informations montrant les profils verticaux de température. La nature et la répartition des émissions locales ne figurent pas au présent mandat. La question des émissions et du transport à plus ou moins longue distance de sources externes et contribuant au rehaussement des concentrations locales de particules fines dans l'air ambiant n'est pas non plus abordée.

Les données utilisées figurent dans la section 4. Les sections 5 à 7 discutent des résultats, et la conclusion est présentée dans la section 8.

Comme demandé par la Ville de Québec, toutes les données utilisées sont remises sur des fichiers lisibles au format CSV ou TXT.

2. INTRODUCTION

Le terme « smog » est une contraction de l'expression anglaise « *smoke and fog* », le smog ayant été associé à des conditions météorologiques propices à la formation de brouillard et à des émissions de « fumée ». Les conditions météorologiques propices au brouillard se retrouvent généralement en présence d'une zone de haute pression (ou anticyclone), un vent faible et une inversion de température. Dans le passé, des conditions de smog ont été notoires à Londres dans les années 1950 et 1960, avec des émissions de dioxyde de soufre (SO₂) et de particules provenant de sources industrielles, du transport et du chauffage lors de brouillard. Le smog a aussi été identifié ailleurs, et plus particulièrement à Los Angeles, où sa nature était photochimique et associée à l'ozone (bien qu'il y ait d'autres contaminants). Dans ce cas, la formation d'ozone dans le smog photochimique est favorisée lors de temps chaud et ensoleillé en présence de contaminants précurseurs, tels que les oxydes d'azote et les composés organiques volatils, les deux étant particulièrement liés au transport.

La problématique du smog a été reconnue au Québec dans le cadre des préoccupations relatives au dépérissement des forêts (particulièrement des érables) et des dommages causés aux productions agricoles. Dans le but de mieux comprendre cette problématique, le ministère de l'Environnement du Québec a mis en place un vaste réseau de mesures. Ce dernier, développé à partir de 1988 (Leduc, 1989), comptait initialement 17 stations réparties au Québec et visait explicitement à caractériser les épisodes de smog photochimique en milieu extra-urbain.

La question du transport de longue distance était aussi un aspect de cette problématique. La collaboration entre les diverses entités gouvernementales et l'élargissement des réseaux de mesures ont rendu possible la mise en place du programme Info-Smog.

L'évolution de la situation et des contrôles des polluants précurseurs de la formation de l'ozone a fait en sorte que la problématique du smog photochimique s'est estompée (de même que celle des pluies acides), mais a été remplacée par une autre liée aux particules fines. De manière usuelle, la mesure des particules concernait et concerne encore la mesure des concentrations totales de particules en suspension. L'échantillonnage est simple, et on en retrouve dans plusieurs milieux visant à caractériser l'exposition en général ou pour un suivi particulier d'une installation, par exemple. Cependant, les effets sur la santé concernent davantage les particules fines, celles d'un diamètre inférieur à 2,5 micromètres (μm) (aussi appelées $\text{PM}_{2,5}$) qui peuvent pénétrer loin dans le système respiratoire (voir Vallero, 2014, pour une discussion à cet effet, de même qu'une revue du domaine de la qualité de l'air).

L'échantillonnage des $\text{PM}_{2,5}$ est devenu de plus en plus accessible grâce au développement d'instruments fiables et relativement simples. Ainsi, la mesure a pu se répandre, et les responsables environnementaux ainsi que les industries ont pu déployer des appareils en plus grand nombre. La disponibilité de mesures permet de caractériser l'exposition en respectant des normes; on constate par ailleurs que des niveaux plus élevés de $\text{PM}_{2,5}$ peuvent aussi être associés à des situations météorologiques particulières conduisant à des épisodes également appelés « smog ». Le smog photochimique est lié aux conditions estivales (et parfois printanières), mais nous verrons que le smog « particulaire » est souvent lié à des conditions hivernales, outre celles conduisant (au printemps et en été) à des épisodes en lien avec des incendies de forêt (ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs [MELCCFP], 2023).

Deux valeurs seuils sont utilisées : la norme quotidienne de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ du *Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère* (RAA) et la valeur de référence quotidienne de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS); elles serviront aussi sur une base horaire.

3. MÉTHODOLOGIE

Pour réaliser le mandat, les résultats sont obtenus à partir de concentrations horaires de $\text{PM}_{2,5}$ mesurées à deux stations d'échantillonnage, lesquelles permettent le calcul de concentrations moyennes quotidiennes. Ces deux types de données (horaires et quotidiennes) sont appairées avec les données météorologiques dans le but de caractériser les niveaux par rapport aux conditions météorologiques. Puisque les particules fines font l'objet d'une norme ($30 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et d'une valeur seuil ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$), il est possible d'obtenir des résultats relativement aux dépassements de ces valeurs. Finalement, il sera brièvement question d'épisodes de smog.

Plus spécifiquement, la méthodologie employée est celle-ci :

- obtention des données horaires de particules fines $PM_{2,5}$ à deux stations, soit Vieux-Limoilou et École Primevères sur la période allant de 2018 à 2023;
- obtention des données météorologiques horaires à la station J.-Lesage de l'aéroport de Québec (Québec-A) et de la station Beauport (Beauport) sur la période de 2018 à 2023; roses des vents et statistiques descriptives;
- production de statistiques descriptives générales pour les $PM_{2,5}$ par station;
- calcul des fréquences des dépassements des valeurs seuils de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$;
- calcul des moyennes directionnelles horaires de $PM_{2,5}$ par station;
- obtention de la concentration moyenne horaire de $PM_{2,5}$ selon la vitesse du vent et la température par station;
- obtention des caractéristiques des séries horaires de $PM_{2,5}$ atteignant $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et plus, et atteignant $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et plus;
- compilation des moyennes quotidiennes par station;
- calcul des concentrations quotidiennes de $PM_{2,5}$ selon la vitesse du vent et la température par station;
- concentrations quotidiennes et épisodes de smog;
- illustrations de cas d'épisodes;
- conclusion.

Les épisodes de smog étudiés proviennent de nos archives; il y en a peut-être d'autres. L'année 2018 a été considérée, étant donné le nombre d'épisodes.

4. DONNÉES

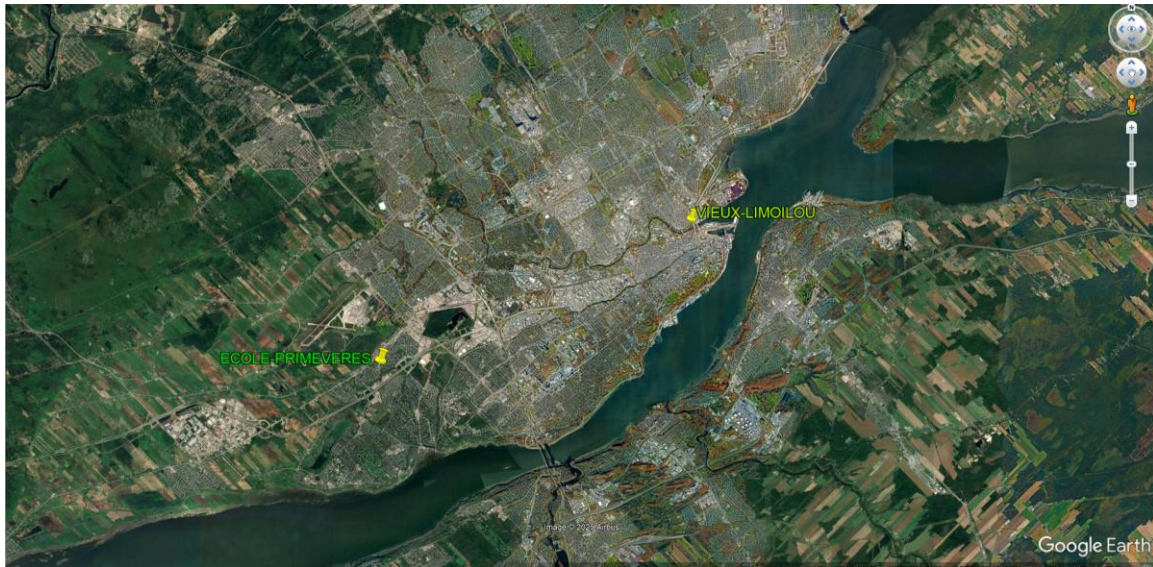
Dans le but d'illustrer concrètement la discussion, il est nécessaire d'utiliser des données réelles. À cette fin, la période de six ans s'étalant de 2018 à 2023 a été choisie pour les particules fines et la météorologie.

4.1 Particules fines

Deux stations ont été retenues pour illustrer les résultats : Vieux-Limoilou (V-Limoilou) et École Primevères (Primevères). Les concentrations horaires de $PM_{2,5}$ ont été obtenues du MELCCFP par le site Web Données Québec. Les fichiers annuels sont de type CSV.

La localisation des stations est présentée dans la Figure 1.

Figure 1. Localisation des stations Vieux-Limoilou et École Primevères



Le Tableau 1 présente le nombre d’observations disponibles par année sur la période pour les deux stations.

Tableau 1. Nombre de concentrations de $PM_{2,5}$ par année et par station

N	Station	
	V-Limoilou	Primevères
$PM_{2,5}$		
2018	8 491	8 583
2019	8 741	8 593
2020	8 359	8 770
2021	8 101	8 659
2022	8 699	8 569
2023	7 263	8 715
Total	49 654	51 889

4.2 Météorologie

Deux stations météorologiques d’Environnement Canada sont en fonction sur le territoire : une à l’aéroport international Jean-Lesage de Québec (Québec-A) et l’autre dans la baie de Beauport (Beauport). Les données météorologiques retenues sont la vitesse et la direction du vent aux deux stations ainsi que la température à Québec-A, étant donné la série incomplète de température à la station Beauport.

Néanmoins, sur la série de données disponibles aux deux stations, on note que le coefficient de corrélation pour la température est de 99 %, ce qui montre le lien étroit entre les deux endroits. Le nombre d'observations par année aux deux stations figure dans le Tableau 2.

Tableau 2. Nombre d'observations météorologiques par année et par station

Année	N Vitesse	N Direction	N Température
Québec-A			
2018	8 734	8 734	8 734
2019	8 552	8 552	8 552
2020	8 696	8 696	8 695
2021	8 382	8 382	8 382
2022	8 747	8 747	8 747
2023	8 751	8 751	8 751
Total	51 862	51 862	51 861
Beauport			
2018	7 340	7 340	
2019	8 621	8 621	
2020	8 711	8 711	
2021	7 753	7 753	
2022	8 749	8 749	
2023	8 750	8 750	
Total	49 924	49 924	

Dans ce qui suit, les concentrations de particules fines de la station Primevères sont appairées avec celles de la station Québec-A (température et vent), tandis que celles de la station V-Limoilou sont appairées à celles de Beauport pour le vent et la température, et à celles de Québec-A pour la température.

5. MÉTÉOROLOGIE

Les statistiques descriptives pour la vitesse et la température figurent dans le Tableau 3. On constate qu'à Beauport, la vitesse est plus grande qu'à Québec-A, possiblement en raison d'une exposition vers le fleuve.

Tableau 3. Statistiques descriptives pour la météorologie

	Nombre	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum	Médiane
Québec-A						
Vitesse (km/h)	51 862	9,47	7,06	0	54	8
Température (°C)	51 861	5,48	12,02	-36,4	33,7	5,7
Beauport						
Vitesse (km/h)	49 924	12,89	8,38	0	67	11

Les fréquences des directions du vent sont présentées dans le Tableau 4, ainsi que la vitesse moyenne par direction. Beauport montre des fréquences assez différentes dans certaines directions, et la vitesse moyenne diffère aussi de celle de Québec-A, particulièrement dans les directions nord-est (NE), est-nord-est (ENE) et est (E) en provenance du fleuve. Les vents calmes (CLM) sont plus fréquents à Québec-A, soit 12,7 %, comparativement à environ 4,5 % à Beauport. Un vent calme est une absence de vent ou de mouvement de l'air (https://climat.meteo.gc.ca/glossary_f.html#c).

Tableau 4. Fréquences des directions et vitesses moyennes (km/h)

Direction	Fréquence (%)		Vitesse (km/h)	
	Québec-A	Beauport	Québec-A	Beauport
N	4,86	2,92	5,65	7,93
NNE	1,13	2,22	3,91	6,99
NE	1,79	6,45	5,27	12,35
ENE	9,97	14,39	12,09	18,73
E	12,94	10,76	11,62	16,65

Direction	Fréquence (%)		Vitesse (km/h)	
	Québec-A	Beauport	Québec-A	Beauport
ESE	1,05	0,56	7,7	6,48
SE	0,69	0,42	7,1	5,48
SSE	0,51	0,76	6,97	7,39
S	1,19	1,76	6,91	7,6
SSO	2,23	1,5	7,88	8,81
SO	7,28	8,29	9,7	13,26
OSO	16,54	21,37	12,36	13,91
O	12,97	15,01	12,63	12,1
ONO	6,58	4,48	11,69	11,02
NO	4,19	2,83	11,27	10,39
NNO	3,36	1,82	8,68	8,76
CLM	12,72	4,47		
Direction = direction d'où vient le vent; N = nord; S = sud; E = est; O = ouest				

6. PARTICULES FINES — BASE HORAIRE

6.1 Résultats et dépassements des valeurs seuils

Les statistiques descriptives pour les PM_{2,5} horaires sont présentées dans le Tableau 5. La moyenne de la station Primevères est de 10 % supérieure à celle de V-Limoilou; la distribution diffère aussi, les divers centiles y étant plus élevés. Le maximum est également plus élevé et, aux deux endroits, il dépasse 150 µg/m³. Ces taux sont associés aux incendies de forêt de 2023 et, d'ailleurs, le MELCCFP en discute dans son rapport de 2023. Le seuil horaire de 15 µg/m³ est dépassé au centile 90 aux deux stations, et le seuil horaire de 30 µg/m³ l'est au centile 99 à V-Limoilou et au centile 98 à Primevères.

Tableau 5. Statistiques descriptives PM_{2,5} horaires (µg/m³)

Nombre	Moyenne	Écart-type	Maximum	Minimum	Médiane	C90	C95	C98	C99
PM_{2,5} horaires (µg/m³) V-Limoilou									
49 654	8,36	6,82	158,41	0,28	6,43	15,67	21,03	28,65	34,19
PM_{2,5} horaires (µg/m³) Primevères									
51 889	9,20	8,50	179,69	0,15	6,61	18,31	25,27	35,21	42,51

Globalement, les concentrations horaires des deux stations sont corrélées avec $r = 0,84$, indiquant des influences communes.

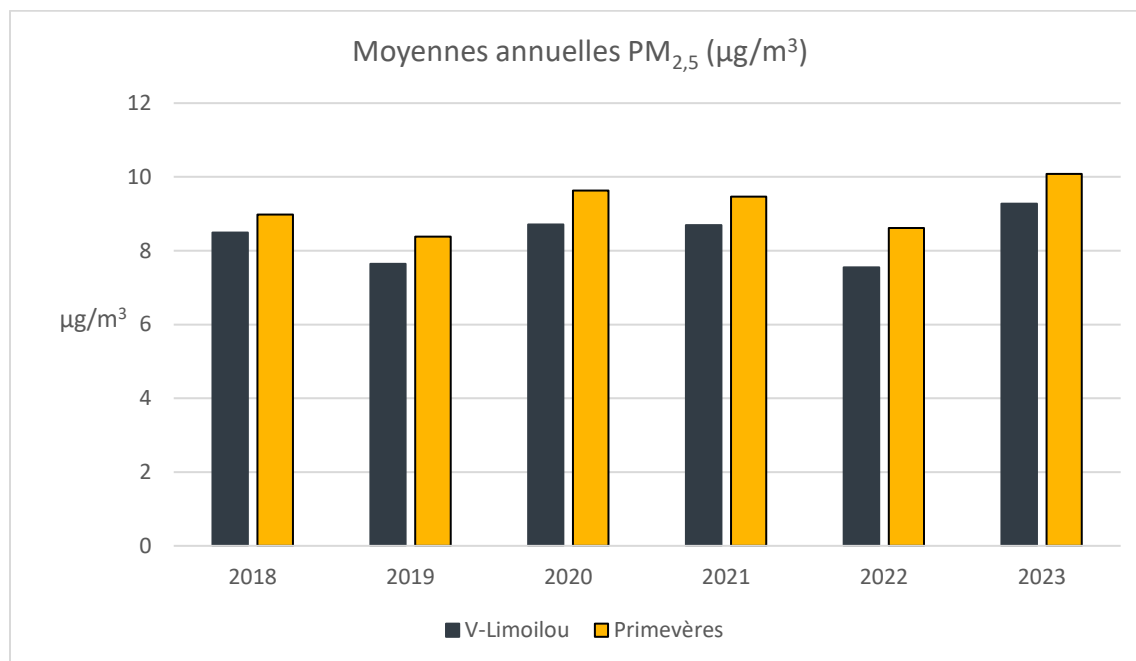
Les résultats par année figurent dans le Tableau 6 et sont illustrés dans la Figure 2. Les moyennes annuelles de Primevères sont toutes supérieures à celles de V-Limoilou; on constate aussi le rehaussement important de 2023 dû aux incendies de forêt. Il ne semble pas y avoir de tendance particulière durant la période, outre celle de 2023.

Tableau 6. Résultats annuels PM_{2,5} (µg/m³)

Année	Nombre	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum	Médiane
PM_{2,5} (µg/m³) V-Limoilou						
2018	8 491	8,49	6,32	0,30	58,59	6,58
2019	8 741	7,65	5,46	0,62	62,25	6,21
2020	8 359	8,72	7,52	0,28	77,33	6,38
2021	8 101	8,70	7,33	0,58	104,82	6,54
2022	8 699	7,55	5,67	0,44	71,04	6,09
2023	7 263	9,27	8,32	0,45	158,41	7,07
PM_{2,5} (µg/m³) Primevères						
2018	8 583	8,98	8,02	0,22	73,65	6,39
2019	8 593	8,38	7,28	0,23	74,54	6,20
2020	8 770	9,63	9,18	0,15	96,32	6,67

Année	Nombre	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum	Médiane
2021	8 659	9,46	8,32	0,29	96,66	6,86
2022	8 569	8,62	7,99	0,17	133,81	6,44
2023	8 715	10,08	9,82	0,28	179,69	7,15

Figure 2. Illustration des moyennes annuelles de PM_{2,5} (µg/m³)



Les fréquences des concentrations horaires supérieures aux deux seuils sont présentées dans le Tableau 7 pour V-Limoilou. On constate que les fréquences au-dessus de 15 µg/m³ sont entre environ 8 % (2022) et environ 15 % selon l'année, la plus élevée étant celle de 2023. La fréquence globale est de 11 %. Pour le seuil de 30 µg/m³, la fréquence globale est de 1,71 %, avec un maximum de 2,80 % en 2020, et les années 2019 et 2022 avoisinent 0,9 % et 1 %.

Tableau 7. Fréquence annuelle des dépassements des valeurs seuils à V-Limoilou

V-Limoilou							
Nombre %	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Total
< 15 µg/m ³	7 522	8 064	7 316	7 098	8 011	6 187	44 198
	88,59	92,25	87,52	87,62	92,09	85,19	89 %

V-Limoilou							
Nombre %	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Total
≥ 15 µg/m ³	969	677	1 043	1 003	688	1 076	5 456
	11,41	7,75	12,48	12,38	7,91	14,81	11 %
Total	8 491	8 741	8 359	8 101	8 699	7 263	49 654
< 30 µg/m ³	8 358	8 662	8 125	7 921	8 612	7 125	48 803
	98,43	99,1	97,2	97,78	99	98,1	98,29 %
≥ 30 µg/m ³	133	79	234	180	87	138	851
	1,57	0,90	2,80	2,22	1,00	1,90	1,71 %
Total	8 491	8 741	8 359	8 101	8 699	7 263	49 654

À Primevères (Tableau 8), la fréquence des dépassements du seuil de 15 µg/m³ varie entre 11,53 % (2019) et 18,62 % (2023), pour une fréquence globale de 14,82 %. Pour le seuil de 30 µg/m³, la fréquence globale des dépassements est de 3,16 % et, annuellement, la fréquence se situe entre 2,37 % (2019) et 4,63 % (2020), valeurs qui sont plus élevées que celles de Limoilou.

Tableau 8. Fréquence annuelle des dépassements des valeurs seuils à Primevères

Primevères							
Nombre %	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Total
< 15 µg/m ³	7 328	7 602	7 363	7 289	7 525	7 092	44 199
	85,38	88,47	83,96	84,18	87,82	81,38	
≥ 15 µg/m ³	1 255	991	1 407	1 370	1 044	1 623	7 690
	14,62	11,53	16,04	15,82	12,18	18,62	
Total	8 583	8 593	8 770	8 659	8 569	8 715	51 889
< 30 µg/m ³	8 324	8 389	8 364	8 361	8 345	8 415	50 198
	96,98	97,63	95,37	96,56	97,39	96,56	

Primevères							
Nombre %	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Total
$\geq 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$	259	204	406	298	224	300	1 691
	3,02	2,37	4,63	3,44	2,61	3,44	
Total	8 583	8 593	8 770	8 659	8 569	8 715	51 889

La Figure 3 et la Figure 4 illustrent la répartition annuelle du dépassement du seuil horaire de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aux deux stations. On constate, à Primevères, l'importance des dépassements de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2023 et de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2020.

Figure 3. Fréquence annuelle des concentrations horaires $\geq 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$

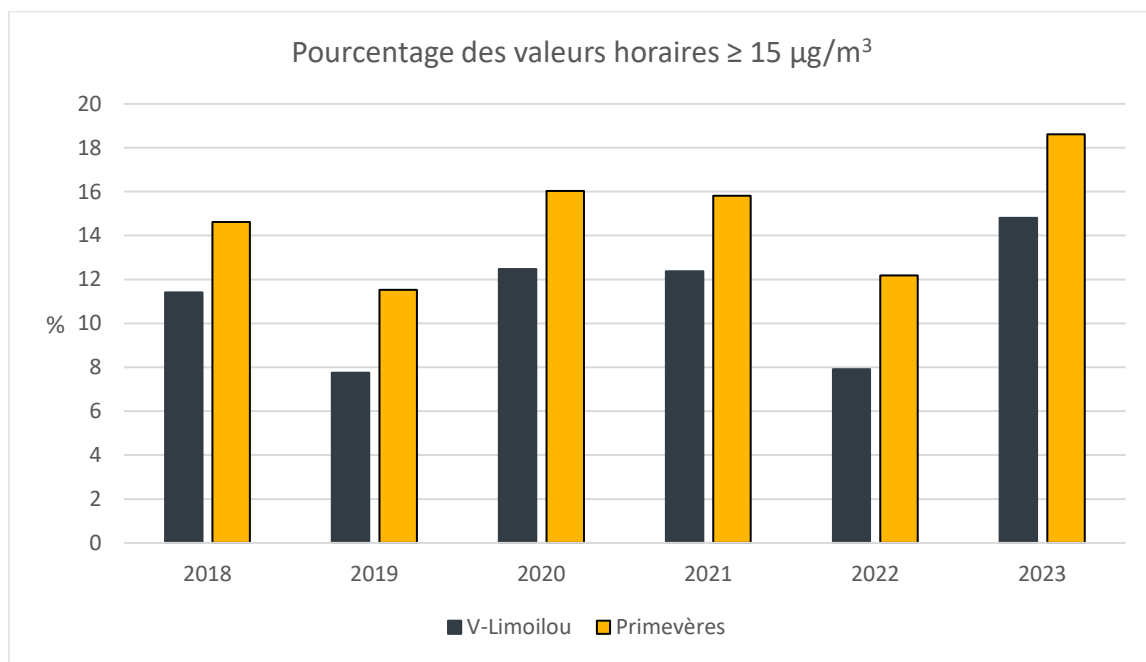
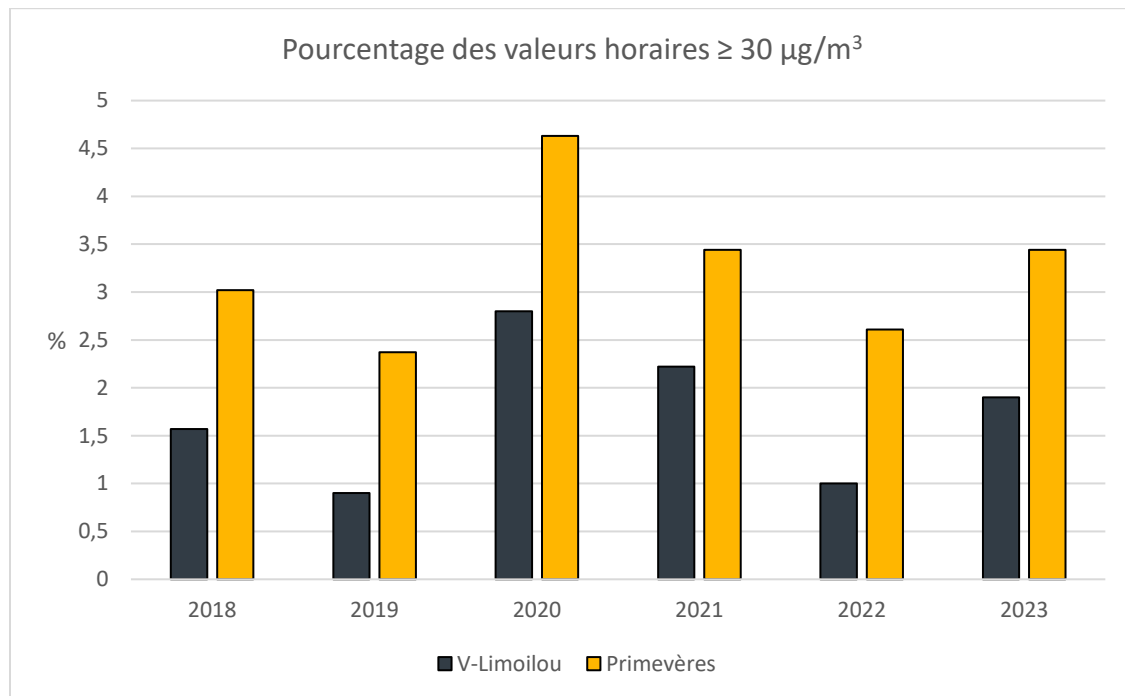


Figure 4. Fréquence annuelle des concentrations horaires $\geq 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$



6.2 Moyennes directionnelles horaires

Les concentrations horaires de $\text{PM}_{2,5}$ sont appairées avec les directions de vent horaires : celles de V-Limoilou avec Beauport et celles de Primevères avec Québec-A. Les moyennes directionnelles sont illustrées dans la Figure 5.

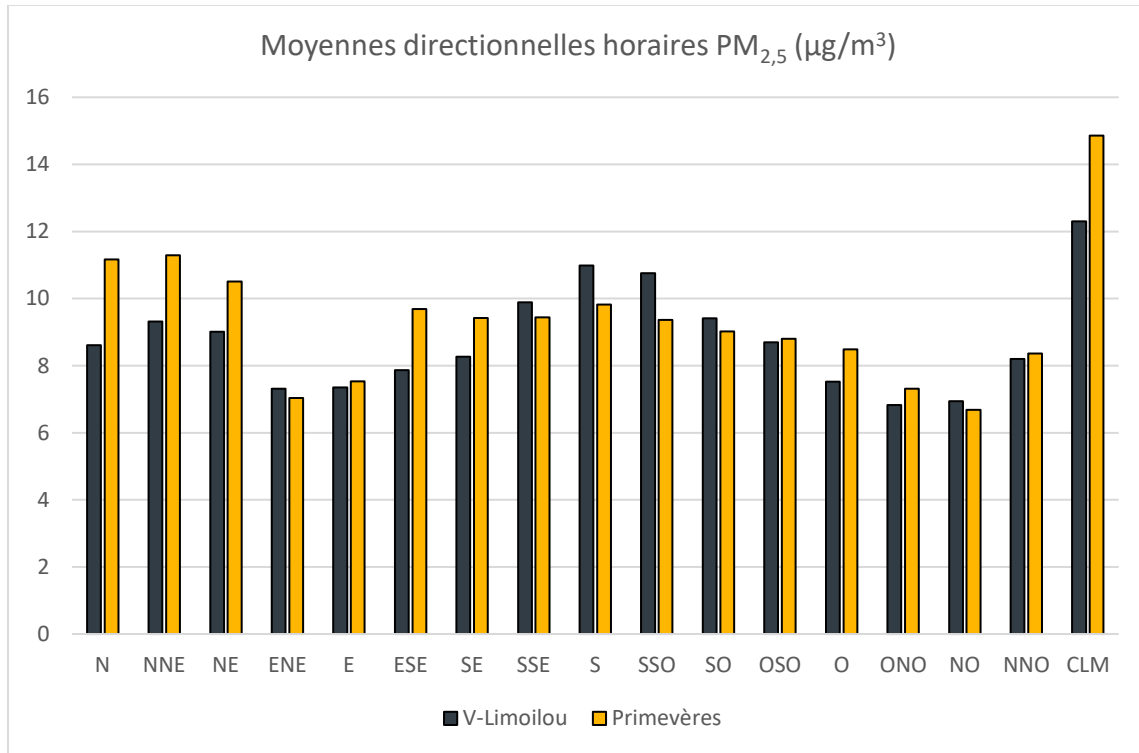
On constate que les vents calmes procurent les concentrations les plus élevées aux deux stations, soit $12,30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $14,85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivement.

À V-Limoilou, les directions est-nord-est et est comprennent le fleuve et le secteur portuaire, ce qui peut expliquer la diminution dans ces directions, mais il y a quand même les autoroutes dans ces directions. Au sud, il y a tout le secteur densément urbanisé qui contribue à rehausser les concentrations.

À Primevères, les directions nord à sud-ouest comprennent des sources urbaines; il y a moins de sources urbaines en direction nord-ouest. Néanmoins, la station est située en secteur résidentiel, lequel serait possiblement une source de particules associées au chauffage au bois. Aux deux stations, la diminution pour les directions est-nord-est et est est peut-être attribuable au fait que ces directions sont souvent associées à des conditions amenant des précipitations.

Il est donc possible de voir, dans ces résultats, l'influence du milieu urbain, mais aussi le fait que la moyenne la plus élevée est associée à des vents calmes, c'est-à-dire à des conditions locales ou, du moins, à des conditions qui ne favorisent pas la dilution des contaminants, notamment les $PM_{2,5}$.

Figure 5. Moyennes directionnelles horaires des $PM_{2,5}$ ($\mu g/m^3$) aux deux stations



6.3 Influence des conditions météorologiques — base horaire

Les concentrations moyennes de $PM_{2,5}$ horaires à V-Limoilou figurent dans le Tableau 9 en fonction de la température et de la vitesse du vent, aussi sur une base horaire. On constate la diminution avec la vitesse du vent; il y a aussi une diminution avec l'augmentation de la température, sauf pour la température la plus élevée; cela serait attribuable aux concentrations élevées mesurées lors d'incendies de forêt. En période plus froide, sous $1,7^\circ C$ avec des vents légers de moins de 3 km/h, les concentrations horaires affichent des valeurs à la hausse.

Tableau 9. Concentrations moyennes de PM_{2,5} (µg/m³) à V-Limoilou en fonction de la température (T) et de la vitesse du vent (V)

V-Limoilou PM _{2,5} µg/m ³ km/h °C	V ≤ 3	3 < V ≤ 6	6 < V ≤ 10	10 < V ≤ 15	V > 15	Total
T ≤ -4,9	16,17	15,55	11,32	7,54	5,51	9,22
-4,9 < T ≤ 1,7	14,46	12,70	9,99	7,31	5,81	8,72
1,7 < T ≤ 9,9	11,35	9,53	7,62	6,40	5,37	7,11
9,9 < T ≤ 17,1	10,88	8,55	7,29	6,32	6,03	7,43
T > 17,1	10,64	10,59	9,65	8,66	8,08	9,22
Total	12,41	11,32	8,88	7,31	6,04	8,37

À Primevères (Tableau 10), on constate aussi le rehaussement des concentrations horaires avec la diminution de la température et de la vitesse du vent. Cela indique l'influence des sources locales. En période plus froide, sous 1,7 °C avec des vents légers de moins de 6 km/h, les concentrations montrent un rehaussement, surtout pour des vents de moins de 3 km/h et une température sous -4,9 °C.

Tableau 10. Concentrations moyennes (µg/m³) de PM_{2,5} à Primevères en fonction de la température (T) et de la vitesse du vent (V)

Primevères PM _{2,5} µg/m ³ km/h °C	V ≤ 3	3 < V ≤ 6	6 < V ≤ 10	10 < V ≤ 15	V > 15	Total
T ≤ -4,9	21,19	17,11	9,89	7,26	4,84	11,83
-4,9 < T ≤ 1,7	16,82	12,36	9,02	6,73	4,65	9,68
1,7 < T ≤ 9,9	10,04	8,58	6,98	5,71	4,27	7,11
9,9 < T ≤ 17,1	10,53	8,45	6,62	5,58	4,64	7,58
T > 17,1	12,45	10,92	10,00	8,51	7,43	9,87
Total	14,32	11,16	8,53	6,84	5,00	9,22

6.4 Caractéristiques des séries horaires

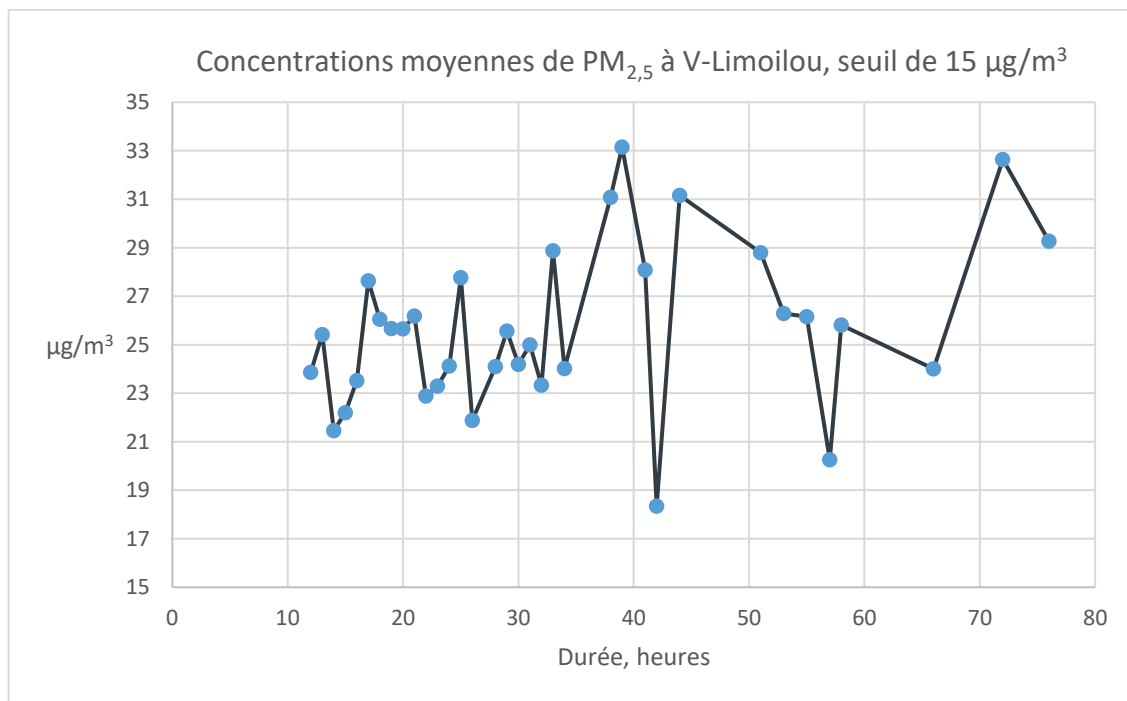
Une manière d'illustrer les concentrations élevées de $PM_{2,5}$ consiste à examiner leurs caractéristiques par rapport à leur durée. On a ainsi obtenu les séries des concentrations horaires supérieures ou égales à $15 \mu g/m^3$ et à $30 \mu g/m^3$.

À V-Limoilou, on a par exemple 274 valeurs individuelles (c.-à-d. une seule heure) au-dessus de $15 \mu g/m^3$ et 73 au-dessus de $30 \mu g/m^3$. La série la plus longue au-dessus de $15 \mu g/m^3$ est de 76 heures consécutives et, au-dessus de $30 \mu g/m^3$, la durée la plus longue est de 28 heures consécutives.

On considère, dans ce qui suit, les séries de 12 heures consécutives et plus pour le seuil de $15 \mu g/m^3$ et de 6 heures consécutives et plus pour le seuil de $PM_{2,5}$ de $30 \mu g/m^3$.

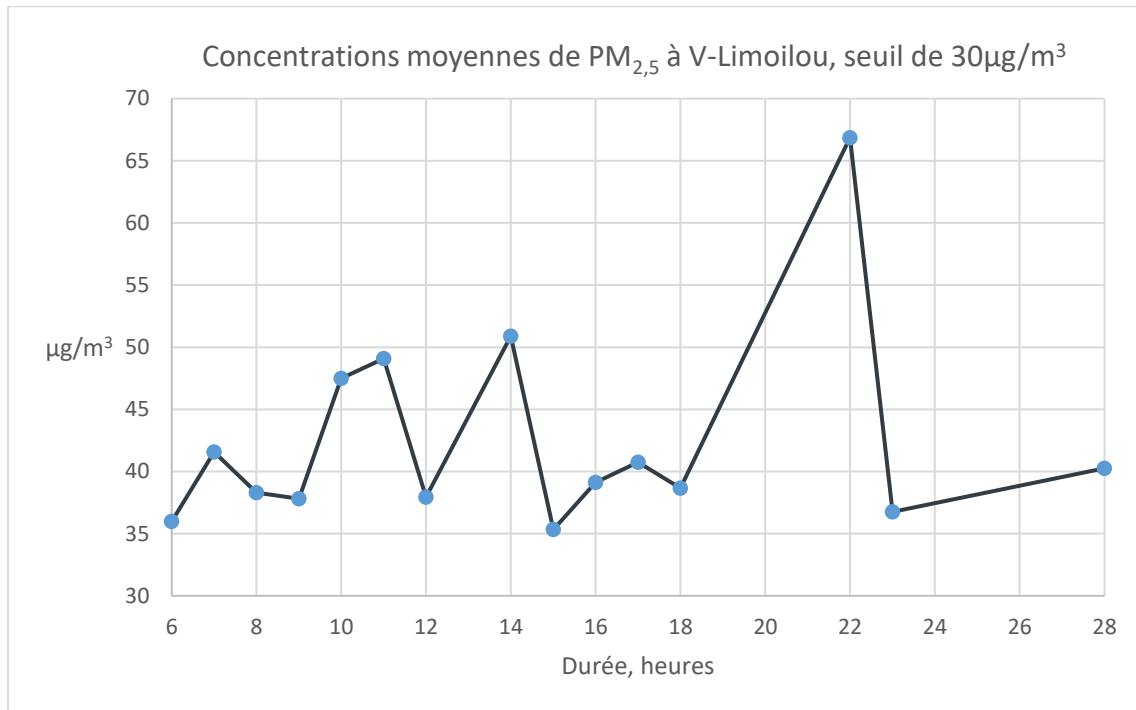
La Figure 6 montre les concentrations moyennes en fonction de la durée pour le seuil de $15 \mu g/m^3$ à V-Limoilou. La moyenne maximale de $PM_{2,5}$ de $33 \mu g/m^3$ est obtenue pour une série de 39 heures.

Figure 6. Concentrations moyennes ($\mu g/m^3$) de $PM_{2,5}$ à V-Limoilou en fonction de la durée (seuil de $15 \mu g/m^3$, 12 heures et plus)



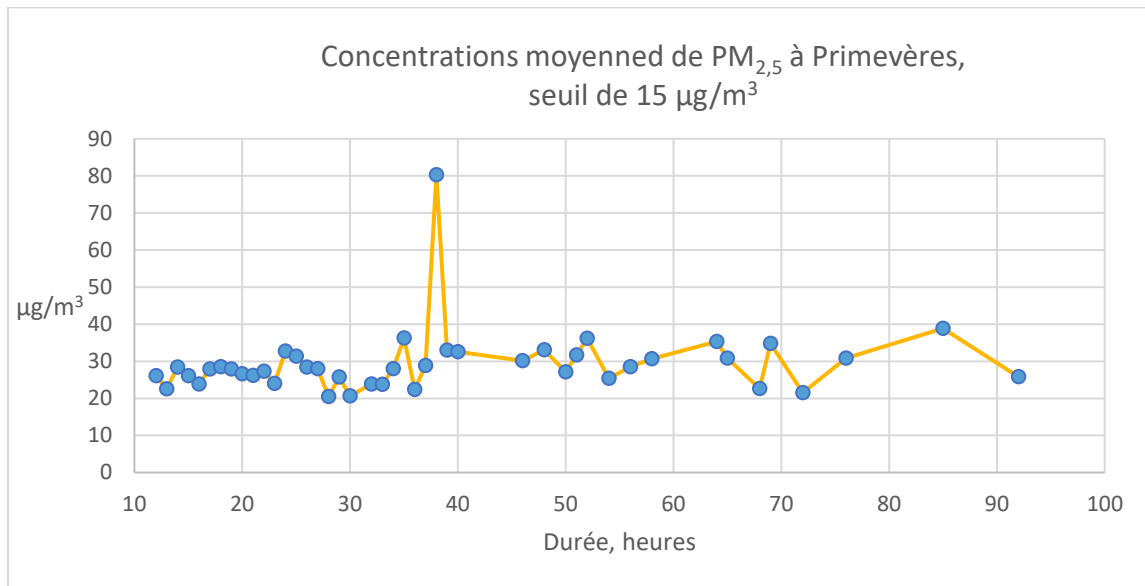
La Figure 7 illustre les moyennes horaires de $PM_{2,5}$ à V-Limoilou pour les séries de 6 heures consécutives et plus au seuil de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et plus; les durées non obtenues sont absentes (de 19 à 21 et de 24 à 27). La concentration maximale est de $66,86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour une durée de 22 heures; elle a été mesurée du 25 juin 2023 à 6 h au 26 juin 2023 à 3 h, période associée aux incendies de forêt.

Figure 7. Concentrations moyennes ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de $PM_{2,5}$ à V-Limoilou en fonction de la durée (seuil de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 6 heures et plus)



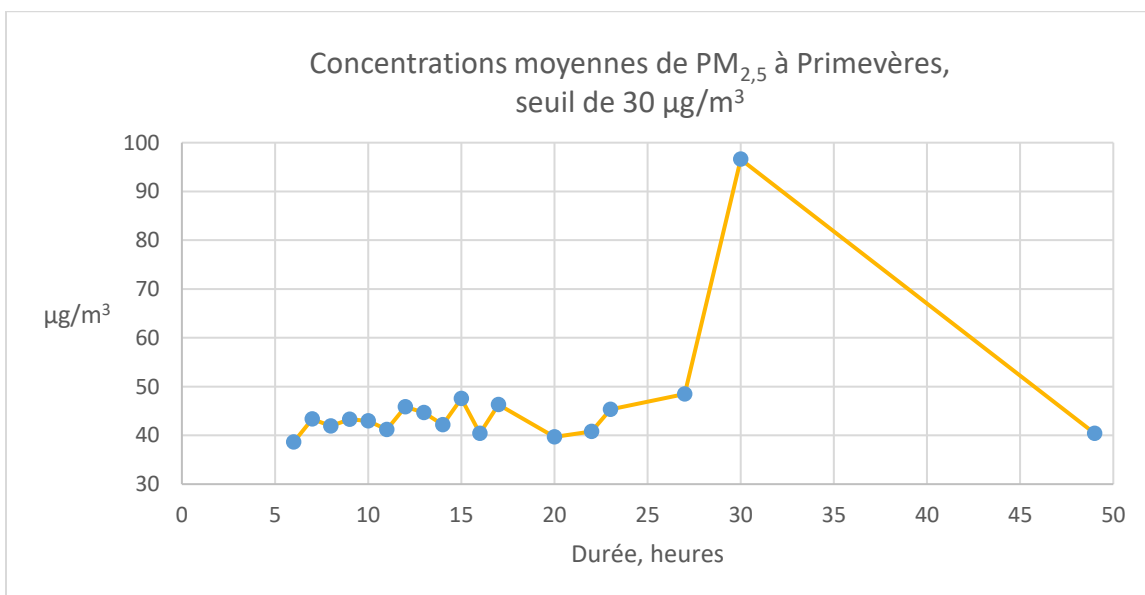
À Primevères, la plus longue série de concentrations horaires de $PM_{2,5}$ atteignant $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ est de 92 heures consécutives, enregistrée du 11 juin 2023 à 10 h au 15 juin 2023 à 5 h. La Figure 8 illustre les concentrations moyennes pour les séries de 12 heures consécutives et plus. La concentration maximale est de $80,26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour la période de 38 heures allant du 25 juin 2023 à 4 h au 26 juin 2023 à 17 h lors des incendies de forêt.

Figure 8. Concentrations moyennes ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de $\text{PM}_{2,5}$ à Primevères en fonction de la durée (seuil de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 12 heures et plus)



La plus longue série de concentrations atteignant $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ est de 49 heures (Figure 9) consécutives. Elle a été mesurée du 5 août 2021 à 8 h au 7 août 2021 à 8 h; il n'y a eu aucune série entre 31 heures et 48 heures. La concentration moyenne maximale de $96,59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ est obtenue avec la série de 30 heures, entre le 25 juin 2023 à 5 h et le 26 juin 2023 à 10 h lors des incendies de forêt.

Figure 9. Concentrations moyennes ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de $\text{PM}_{2,5}$ à Primevères en fonction de la durée (seuil de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 6 heures et plus)



7. PARTICULES FINES — BASE QUOTIDIENNE

7.1 Résultats et dépassements des valeurs seuils

Cette section présente les résultats obtenus sur une base quotidienne. On a obtenu la moyenne quotidienne de chaque jour; un seuil de 18 concentrations horaires est appliqué pour calculer une moyenne quotidienne.

Le Tableau 11 reprend les statistiques descriptives compilées à partir des moyennes quotidiennes. On dispose de plus de 2 000 jours à V-Limoilou et de plus de 2 100 à Primevères. Les maximums quotidiens aux deux stations dépassent largement la norme de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, et le centile 99 est supérieur à cette valeur à Primevères. Les deux stations sont corrélées avec $r = 0,93$.

Tableau 11. Résultats pour les moyennes quotidiennes de $\text{PM}_{2,5}$

Nombre	Moyenne ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Écart-type	Minimum	Maximum	Médiane	C90	C95	C98	C99
$\text{PM}_{2,5}$ quotidiens ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) V-Limoilou									
2 064	8,36	5,26	1,51	81,55	6,99	14,58	18,62	23,92	28,70
$\text{PM}_{2,5}$ quotidiens ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Primevères									
2 156	9,19	6,40	1,13	97,48	7,48	16,87	21,46	27,81	34,15

Les fréquences de dépassements de la valeur seuil de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de l'OMS et de la norme de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ du RAA sont présentées dans le Tableau 12 et le Tableau 13. À V-Limoilou, 9 % des moyennes quotidiennes atteignent ou dépassent le seuil de l'OMS, et 0,92 %, la norme du RAA. À Primevères, ces valeurs sont rehaussées à 12,76 % et 1,58 %, respectivement.

Tableau 12. Nombre de dépassements des valeurs seuils à V-Limoilou

V-Limoilou		
	Nombre	Pourcentage
< $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$	1 878	90,99
≥ $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$	186	9,01
RAA		
< $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$	2 045	99,08
≥ $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$	19	0,92

Tableau 13. Nombre de dépassements des valeurs seuils à Primevères

Primevères		
	Nombre	Pourcentage
< 15 µg/m ³	1 881	87,24
≥ 15 µg/m ³	275	12,76
RAA		
< 30 µg/m ³	2 122	98,42
≥ 30 µg/m ³	34	1,58

Dans le Tableau 14 et le Tableau 15, on constate que les dépassements des deux valeurs seuils se produisent surtout en hiver (décembre, janvier et février), avec plus de 50 % des cas à Primevères (plus de 75 % des cas de dépassements du seuil de 30 µg/m³), et un peu moins de 50 % à V-Limoilou pour le seuil de 15 µg/m³ et à près de 58 % pour celui de 30 µg/m³. Les pourcentages plus élevés en été (juin, juillet et août) sont associés aux incendies de forêt. Il n'y a eu aucun dépassement du seuil de 30 µg/m³ en mars, avril, mai, septembre, octobre et novembre, sauf pour un cas en mars et un autre en novembre à V-Limoilou.

Tableau 14. Répartition des dépassements des valeurs seuils selon le mois

	N ≥ 15 µg/m ³	N ≥ 30 µg/m ³	N ≥ 15 µg/m ³	N ≥ 30 µg/m ³
	V-Limoilou		Primevères	
Janvier	32	2	60	7
Février	34	5	53	10
Mars	19	1	22	0
Avril	3	0	0	0
Mai	2	0	3	0
Juin	8	2	10	2
Juillet	20	2	27	4
Août	11	2	13	2
Septembre	11	0	10	0
Octobre	5	0	5	0

	N ≥ 15 µg/m ³	N ≥ 30 µg/m ³	N ≥ 15 µg/m ³	N ≥ 30 µg/m ³
	V-Limoilou		Primevères	
Novembre	19	1	31	0
Décembre	22	4	41	9
Total	186	19	275	34

Tableau 15. Pourcentage de dépassements des valeurs seuils par saison

Saison	% ≥ 15 µg/m ³	% ≥ 30 µg/m ³	% ≥ 15 µg/m ³	% ≥ 30 µg/m ³
	V-Limoilou		Primevères	
Déc.-janv.-fév.	47,31	57,89	56,00	76,47
Mars-avr.-mai	12,90	5,26	9,09	0,00
Juin-juil.-août	20,97	31,58	18,18	23,53
Sept.-oct.-nov.	18,82	5,26	16,73	0,00
<div>% = N/Total</div>				

7.2 Influence des conditions météorologiques — base quotidienne

L'effet des conditions météorologiques est noté dans le Tableau 16 et le Tableau 17, qui montrent les concentrations en fonction de la température moyenne quotidienne et de la vitesse moyenne quotidienne du vent. On y constate l'origine hivernale des concentrations plus élevées.

À V-Limoilou, un vent inférieur à 5,4 km/h et une température sous 1,4 °C rehaussent les concentrations, la moyenne dépassant le seuil de 15 µg/m³. À Primevères, les moyennes sont aussi supérieures au seuil de 15 µg/m³ pour un vent à moins de 5,4 km/h et à une température sous 1,4 °C. On constate que les niveaux moyens de V-Limoilou aux températures variant entre 10,1 °C et 17,2 °C sont supérieurs à ceux de Primevères, peu importe la vitesse du vent. De même, ils sont supérieurs à ceux de Primevères pour la dernière classe de vent (V > 13 km/h), sauf pour les plus basses températures.

Aux deux stations, on note la diminution de la concentration avec la vitesse et la température, sauf pour le rehaussement aux températures supérieures à 17,2 °C associées aux conditions lors des incendies de forêt.

Tableau 16. Concentrations moyennes quotidiennes ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de $\text{PM}_{2,5}$ à V-Limoilou en fonction de la moyenne quotidienne de la température (T) et de la vitesse du vent (V)

V-Limoilou $\text{PM}_{2,5}$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ km/h °C	$V \leq 5,4$	$5,4 < V \leq 7,4$	$7,4 < V \leq 9,7$	$9,7 < V \leq 13,0$	$V > 13,0$	Total
$T \leq -5,3$	15,34	10,79	9,61	7,08	5,49	9,12
$-5,3 < T \leq 1,4$	15,76	10,71	8,47	7,05	5,86	8,91
$1,4 < T \leq 10,1$	11,11	7,70	6,89	5,58	4,46	6,73
$10,1 < T \leq 17,2$	9,35	7,10	6,36	5,77	5,83	6,92
$T > 17,2$	11,22	11,00	9,40	8,01	8,27	10,13
Total	12,47	9,30	8,07	6,62	5,48	8,38

Tableau 17. Concentrations moyennes quotidiennes ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de $\text{PM}_{2,5}$ à Primevères en fonction de la moyenne quotidienne de la température (T) et de la vitesse du vent (V)

Primevères $\text{PM}_{2,5}$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ km/h °C	$V \leq 5,4$	$5,4 < V \leq 7,4$	$7,4 < V \leq 9,7$	$9,7 < V \leq 13,0$	$V > 13,0$	Total
$T \leq -5,3$	20,76	14,45	13,07	9,05	6,07	11,82
$-5,3 < T \leq 1,4$	18,41	12,29	9,67	7,67	5,58	9,83
$1,4 < T \leq 10,1$	11,36	8,16	7,00	5,65	4,15	6,91
$10,1 < T \leq 17,2$	9,06	7,03	6,25	5,38	5,52	6,72
$T > 17,2$	12,08	12,02	10,08	8,46	8,02	10,86
Total	14,14	10,29	9,05	7,11	5,46	9,22

7.3 Dépassements et smog — exemples

Cette section comporte une liste des épisodes et une discussion sur quelques exemples. Le Tableau 18 donne la liste des journées avec une concentration atteignant $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et indique si un avis de smog avait été émis (du moins ceux dont on dispose dans nos informations, mais il peut en manquer). Pour les journées avec un radiosondage disponible à Maniwaki (12 UTC), on donne aussi l'intensité de l'inversion lorsqu'elle est présente. La variable DTINV représente la différence de température entre le sommet de l'inversion et celle au sol; plus cette valeur est élevée, plus l'inversion est « intense ».

Il arrive dans certains cas qu'il y ait une couche avec une température égale (ISO) au lieu d'être une inversion prononcée, ou encore qu'une inversion de température ait été présente en altitude (INVALT); les sondages non disponibles sont identifiés par l'abréviation « ND » et ceux sans inversion par l'abréviation « NA ».

On constate que 19 journées atteignent le seuil de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sans qu'un avis ait été émis; 10 journées sous $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ont eu un avis de smog. Certaines journées sont caractérisées par une très forte inversion de température en surface et du temps très froid, comme le 13 décembre 2018, le 1^{er} février 2021 ou encore le 1^{er} février 2023.

Ce type de temps est caractéristique d'une masse d'air de type continental arctique. Cette masse d'air recouvre habituellement une grande région, et il serait intéressant de voir les mesures de $\text{PM}_{2,5}$ à d'autres stations, comme à Trois-Rivières ou à Montréal.

Tableau 18. Liste des avis de smog

AN	MOIS	JOUR	VL	PR	TEMP	VIT	DDOM JOUR	AVIS-SMOG	DTINV
2018	1	19	32,52	33,99	-4,74	11,71	WSW	NON	NA
2018	1	27	19,67	35,37	-8,60	5,75	NE	NON	INVALT
2018	2	15	32,26	37,56	-1,00	10,25	CLM	OUI	9,1
2018	12	13	31,35	39,93	-18,16	2,13	CLM	OUI	28,2
2018	12	14	20,85	36,90	-5,85	2,00	CLM	NON	7,0
2019	1	5	30,21	34,64	-0,10	3,13	CLM	OUI	INVALT
2019	1	15	25,60	29,65	-10,73	15,54	WSW	OUI	ISO
2019	12	22	32,29	33,83	-7,75	8,21	CLM	OUI	8,7
2019	12	23	30,52	34,43	-0,94	11,00	W	OUI	9,7
2020	2	1	23,96	39,07	-7,29	3,67	CLM	OUI	2,4
2020	2	2	28,70	42,14	-6,53	7,33	SW	OUI	2,4
2020	2	3	32,72	39,15	-3,74	15,71	WSW	OUI	ISO
2020	2	10	22,41	30,21	-6,58	8,96	NE	NON	3,6
2020	2	11	36,18	41,85	-3,48	5,63	CLM	OUI	NA
2020	2	12	15,30	17,72	-3,03	19,25	WSW	OUI	ISO

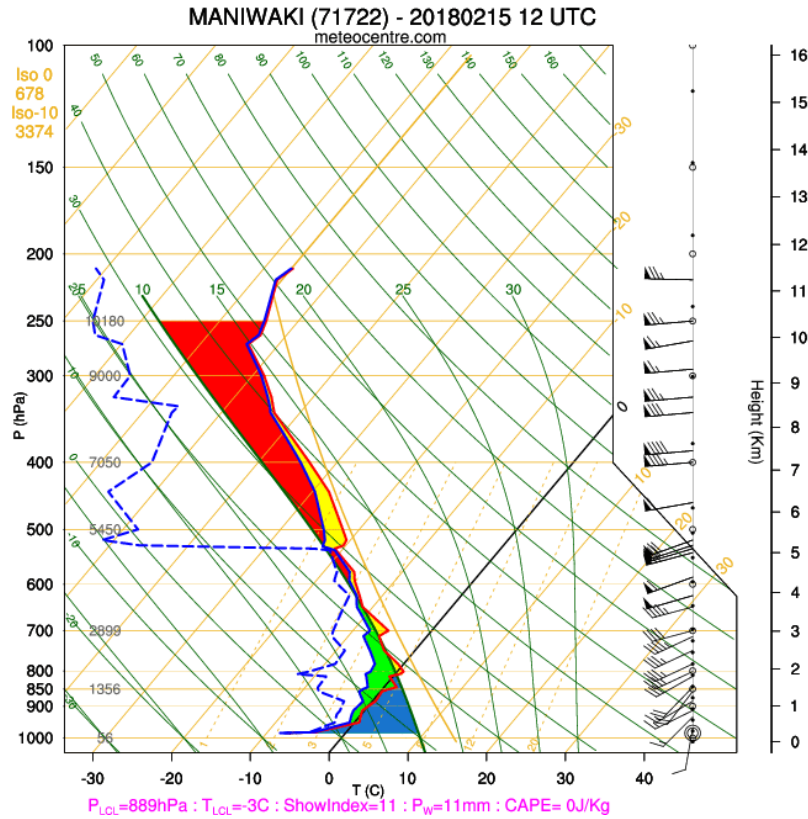
AN	MOIS	JOUR	VL	PR	TEMP	VIT	DDOM JOUR	AVIS-SMOG	DTINV
2020	2	15	17,13	25,01	-19,00	5,00	WSW	OUI	INVALT
2020	2	16	18,05	27,82	-4,60	12,42	WSW	OUI	NA
2020	2	23	29,09	32,84	-2,98	6,75	CLM	NON	5,6
2020	2	24	33,69	34,25	0,60	10,75	WSW	OUI	ISO
2020	9	27	23,51	17,88	18,61	8,33	CLM	OUI	NA
2020	12	19	31,78	40,19	-12,05	4,38	CLM	OUI	8,8
2020	12	20	21,78	25,59	-3,96	7,42	NE	OUI	ISO
2020	12	21	22,61	32,08	-0,94	3,50	CLM	NON	NA
2020	12	22	20,90	24,67	-0,49	10,54	WSW	OUI	NA
2021	2	1	33,99	25,30	-11,14	16,00	ENE	NON	19,8
2021	2	10	16,25	26,14	-12,10	11,67	W	OUI	4,4
2021	3	24	30,50	21,00	6,15	7,10	NNE	NON	ND
2021	7	19	26,45	30,49	22,46	11,50	WSW	NON	ND
2021	7	26	30,53	34,65	19,66	8,71	WSW	NON	ND
2021	8	5	37,88	42,45	20,98	6,59	N	NON	ND
2021	8	6	33,74	36,67	22,11	12,30	WSW	OUI	ND
2022	1	1	19,51	31,20	-0,15	7,04	NE	NON	ND
2022	1	22	23,71	35,75	-21,41	3,50	CLM	OUI	ND
2022	1	23	24,93	42,19	-13,55	11,29	WSW	OUI	ND
2022	1	27	18,43	35,51	-19,46	3,41	CLM	NON	ND
2022	2	17	19,53	30,35	1,26	10,63	ENE	NON	ND
2022	11	27	30,69	22,36	-0,70	9,67	SW	NON	6,9
2022	12	30	25,15	37,61	0,52	3,92	CLM	NON	4,6
2023	2	1	15,64	28,40	-18,19	4,28	CLM	OUI	15,0
2023	2	2	22,01	32,39	-9,22	12,50	SW	NON	2,2

AN	MOIS	JOUR	VL	PR	TEMP	VIT	DDOM JOUR	AVIS-SMOG	DTINV
2023	6	6	11,06	10,86	12,30	8,21	N	OUI	2,0
2023	6	25	81,55	97,48	21,22	8,82	E	OUI	2,2
2023	6	26	30,99	34,32	17,40	30,04	E	NON	2,0
2023	7	13	28,36	33,20	19,15	17,79	E	OUI	2,6
2023	7	18	30,64	34,15	20,03	5,95	N	OUI	1,4
2023	12	25	25,98	31,18	0,51	4,80	CLM	NON	ISO
2023	12	26	23,38	32,35	1,90	12,91	SW	NON	4,0
DTINV = $T_{\text{sommetinversion}} - T_{\text{sol}}$; ISO = couche isothermique; DDOMJOUR = direction dominante de la journée INVALT = inversion en altitude; NA = non applicable; ND = pas de données disponibles									

Le 15 février 2018, Environnement Canada émet un avis de smog. Le matin, on note la présence d'une forte inversion de température, comme cela est illustré dans la Figure 10. La journée n'a pas été très froide, avec une moyenne de -1°C . Une zone de basse pression s'est déplacée de l'ouest du Québec vers le Lac-Saint-Jean durant la journée.

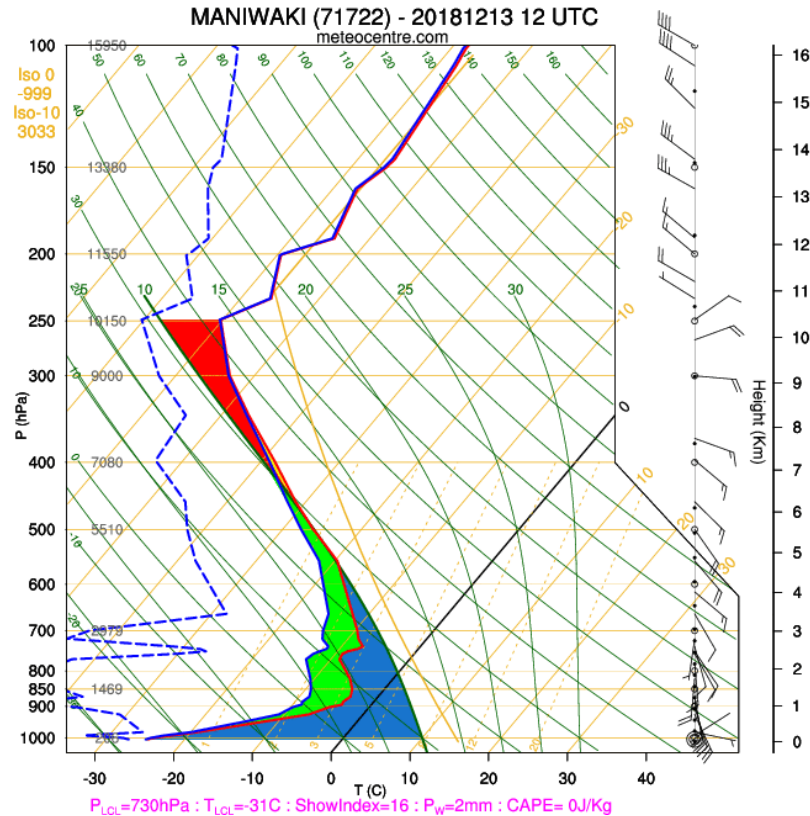
On rapporte du brouillard toute la journée à l'aéroport, et pour quelques heures en après-midi, de la neige suivie de pluie. Bien que la vitesse moyenne soit d'un peu plus de 10 km/h, c'est surtout du vent calme qui a prévalu, sauf en fin de journée. Malgré ce brassage, la couche de mélange est probablement demeurée assez mince (données non disponibles) sous la forte inversion matinale. Les conditions étaient ainsi favorables à une accumulation des particules fines émises localement à la suite d'une mauvaise dispersion verticale.

Figure 10. Radiosondage de Maniwaki le 15 février 2018 12 TUC (metocentre.com)



Le 13 décembre 2018, un avis de smog est émis par Environnement Canada. Une vaste zone de haute pression recouvre le sud du Québec, et les températures sont froides, avec une moyenne de $-18,2^{\circ}\text{C}$. Le vent est faible (moyenne de 2 km/h) et de direction plutôt variable, ce qui est caractéristique de l'influence d'une zone de haute pression. Associée à cet air froid, une forte inversion de température d'une intensité de $28,2^{\circ}\text{C}$ (qui s'est maintenue durant la journée) limite le mélange des contaminants et favorise le rehaussement des concentrations de particules fines sur la région.

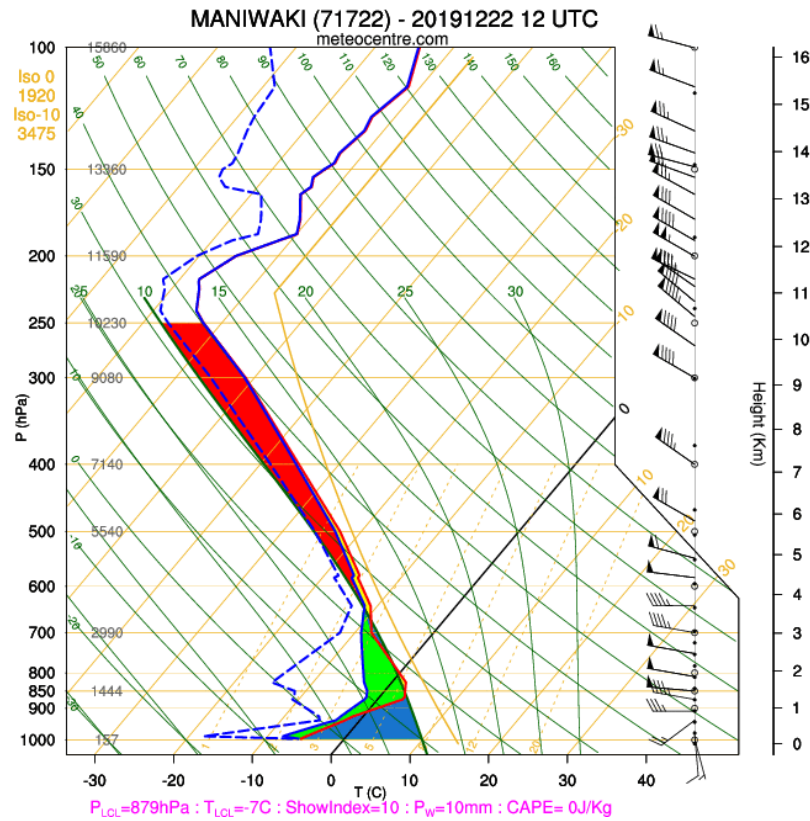
Figure 11. Radiosondage de Maniwaki le 13 décembre 2018 12 UTC (meteocentre.com)



Le 21 décembre 2019, le Québec est envahi par une masse d'air très froid, avec des températures qui s'abaissent sous les -15°C durant la nuit du 21 au 22 décembre. Le matin du 22 décembre (avis de smog), le sondage de Maniwaki montre une couche de mélange limitée en altitude sous une inversion (Figure 12); le tout s'est maintenu pour la majeure partie de la journée. Les températures ont été à la hausse pour atteindre une moyenne d'environ -8°C . Les vents sont faibles le matin, mais augmentent en après-midi. Il y a de la neige une bonne partie de la journée, puis du brouillard. Le matin du 23 décembre, on note aussi une forte inversion de température associée à un apport important d'air chaud en altitude.

Le brouillard persiste durant la nuit du 22 au 23 décembre et pour une bonne partie de la journée du 23; les températures sont à la hausse, et il y a de la pluie en fin de journée. Les deux journées sont marquées par le passage d'une dépression sur le centre du Québec qui a entraîné un apport d'air chaud en altitude; le retour de l'air froid s'est effectué dans la nuit du 23 au 24 décembre. Il semble donc que ce sont les moins bonnes conditions de dispersion (avec une inversion de surface et un apport d'air chaud en altitude) qui ont favorisé le rehaussement des concentrations de particules fines sur le territoire durant ces journées.

Figure 12. Radiosondage de Maniwaki le 22 décembre 2019 12 UTC (metocentre.com)



Divers avis de smog, émis en février 2020, ont été discutés par les médias (Figure 13). Le 11 février, les concentrations étaient effectivement élevées, soit à $36,18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour V-Limoilou et à $41,85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à Primevères, mais, le lendemain, elles ont respectivement diminué à $15,30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et à $17,72 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Le profil vertical à Maniwaki montrait une couche isotherme (ISO) sans inversion proche du sol.

Figure 13. Extrait du *Journal de Québec* du 12 février 2020

Un hiver à oublier pour la qualité de l'air

Déjà 16 jours de smog à Québec depuis le mois de novembre

Les alertes au smog sont plus fréquentes qu'à l'habitude cet hiver dans la région de Québec, alors que, pour une seizième journée, hier, les personnes à risque ont dû prendre des précautions pour leur santé.

DOMINIQUE LELIÈVRE
Le Journal de Québec

La mauvaise qualité de l'air a amené Environnement Canada à déclencher un autre avertissement, hier, dans les secteurs de Québec, de Montréal, de Laval et de la Mauricie.

Avec 16 jours faisant l'objet de ce genre d'alerte depuis le mois de novembre, l'hiver 2019-2020 n'est pas encore terminé que déjà il se classe au-dessus de la moyenne dans la capitale nationale.

En règle générale, la région connaît 13 jours de smog par hiver.

« C'est plus que la normale, mais est-ce que c'est inhabituel? Chaque hiver est un peu différent », fait remarquer le météorologue de l'agence fédérale Simon Legault.

MÉTÉO ET POLLUTION

Dans les dernières années, certains hivers ont connu une vingtaine de journées de smog, d'autres aussi peu que six.

Les enfants asthmatiques et les personnes souffrant de maladies respiratoires ou cardiaques sont les individus les plus affectés par la pollution. En situation de smog, il leur est recommandé de réduire leur exposition à l'air extérieur.

À Québec, le chauffage au bois est la principale source de particules fines, quoique l'activité industrielle et le transport y contribuent aussi. Les épisodes de smog sont donc plus nombreux en hiver.

Les conditions météorologiques ont aussi une grande influence sur l'air que l'on respire. « Lorsque les vents sont calmes et qu'il n'y a pas de convection verticale dans l'atmosphère, ça maintient la pollution près de la ville », explique Simon Legault.

Au début du mois de février, un épisode de smog de quatre jours s'était assis sur une partie du Québec, dont la région de la capitale.

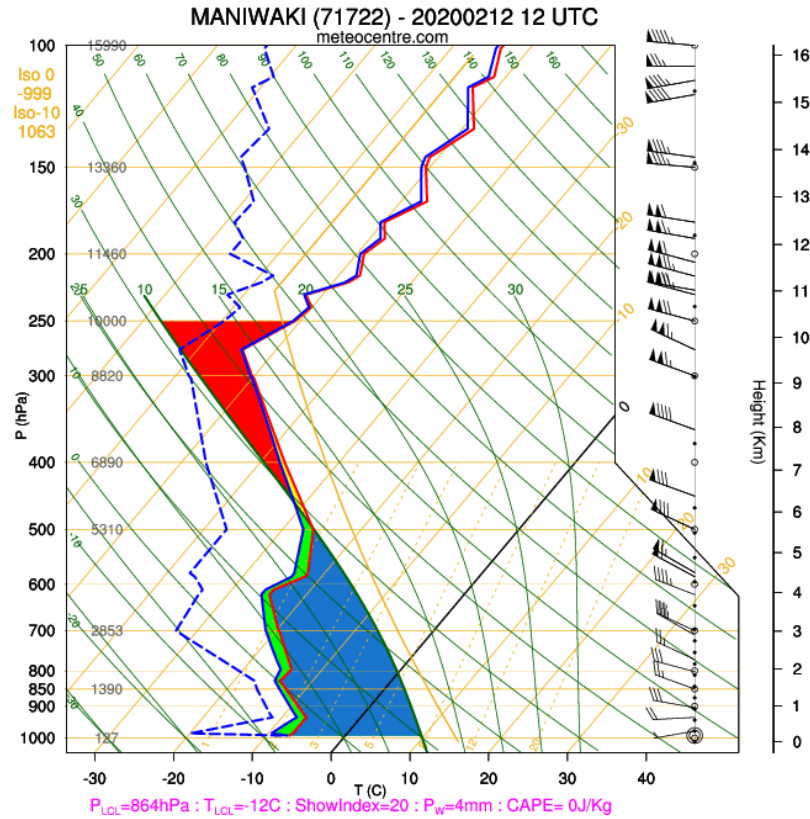
LÉGÈRE DIMINUTION

Cela dit, rien n'indique que la pollution est en croissance au Québec. Au contraire, à travers les décennies, on observe une légère diminution des épisodes de smog, selon M. Legault.

Les rejets provenant des industries ont baissé et les véhicules sont plus performants, bien qu'il y en a plus sur les routes, explique-t-il.

« On ne peut pas changer la météo, on peut seulement changer l'autre aspect, soit les sources de pollution », souligne-t-il.

Figure 14. Radiosondage de Maniwaki le 12 février 2020 12 TUC (metocentre.com)



Les cas précédents illustrent des situations hivernales. Ces conditions sont semblables à celles du 21 et 22 janvier 2025, pour lesquelles un avis de smog a été émis.

À titre de comparaison, on discute d'une situation d'été, celle du 25 et 26 juin 2023 lors des incendies de forêt. Le 25 juin 2023, un avis de smog a été émis, mais pas le 26 juin, journée qui a connu une baisse importante des concentrations.

Le 25 juin 2023, le Québec est dominé par une vaste zone de haute pression (Figure 15), et le vent provient du nord (Figure 16).

Figure 15. Carte de la précipitation et de la pression (niveau moyen de la mer) pour le 25 juin 2023 (ClimateReanalyzer.org)

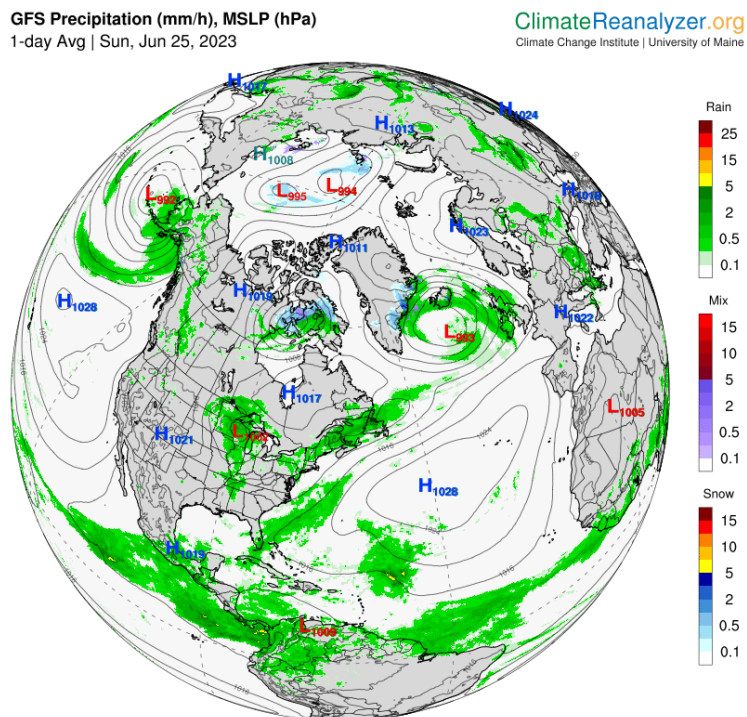
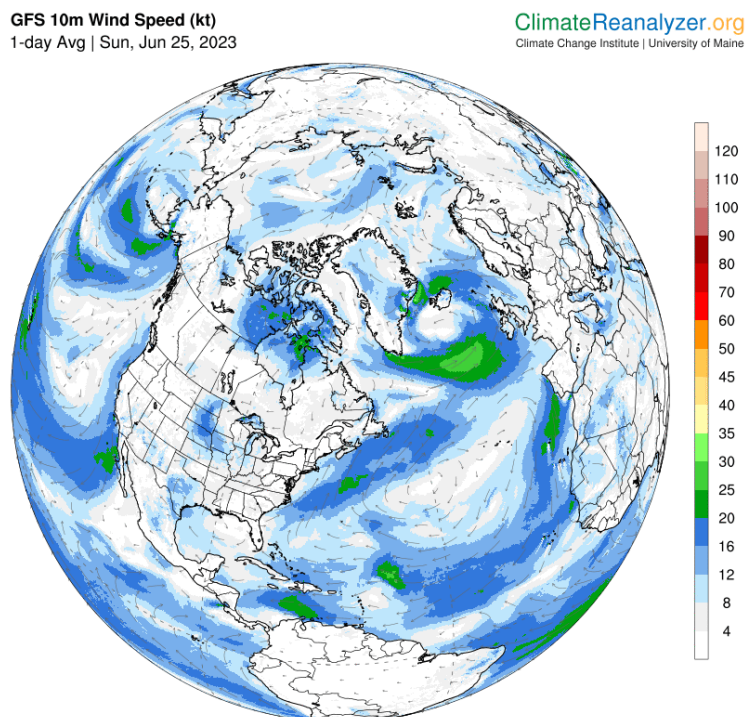
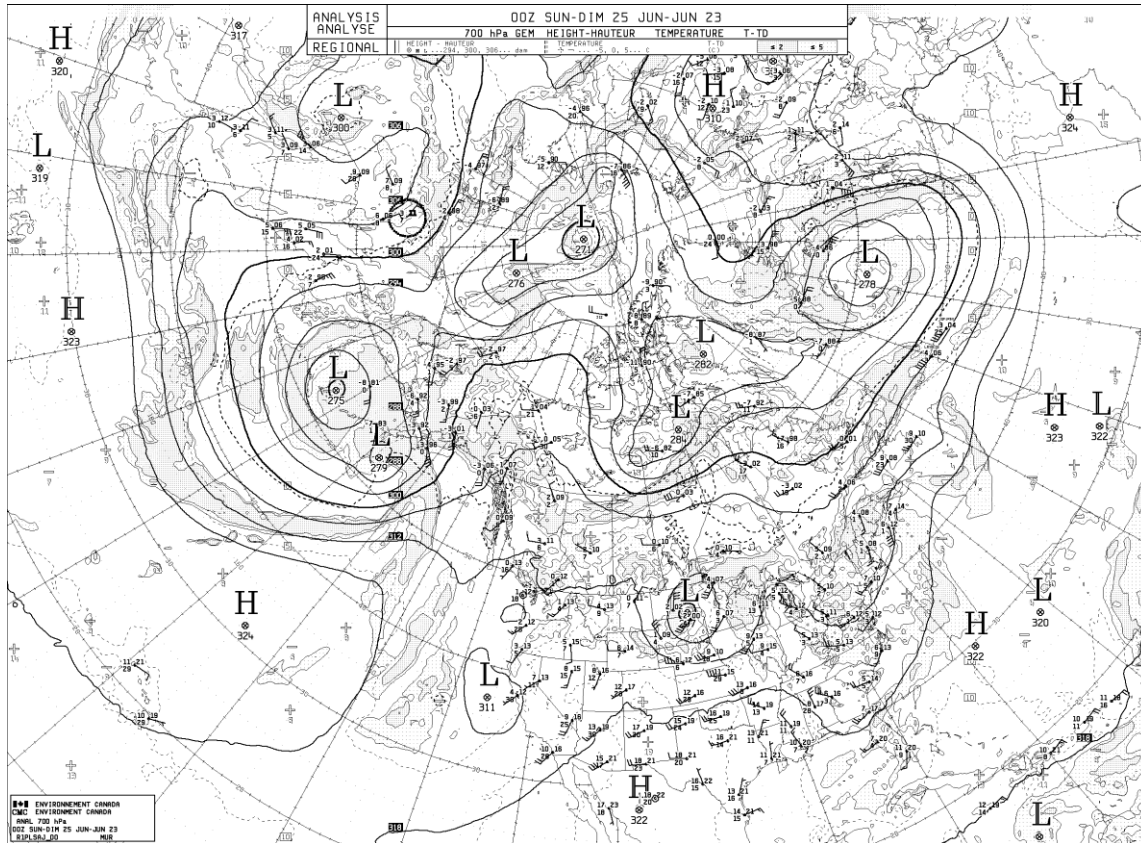


Figure 16. Carte de la vitesse et de la direction du vent à 10 m pour le 25 juin 2023 (ClimateReanalyzer.org)



En altitude (Figure 17), même à environ 3 000 m, la direction du vent favorisait l'apport de particules en provenance des zones incendiées au nord-ouest.

Figure 17. Carte en altitude à 700 mb le 24 juin 2023 00 TUC (CMC Environnement Canada)



À la fin de la journée du 24 juin 2023, le profil montre une zone de mélange extensive, mais, le matin du 25 juin, on note une inversion dont l'intensité est d'un peu plus de 2 °C jusqu'à une hauteur d'environ 1 km ainsi que des vents faibles du nord, une situation favorisant la capture et le maintien des particules près du sol. La situation change le 26 juin 2023 avec l'approche d'une dépression, quoique peu rapide, venant des Grands Lacs, mais qui augmente la vitesse du vent et change sa direction (Figure 19).

Figure 18. Radiosondage de Maniwaki le 24 juin 2023 00 TUC (metocentre.com)

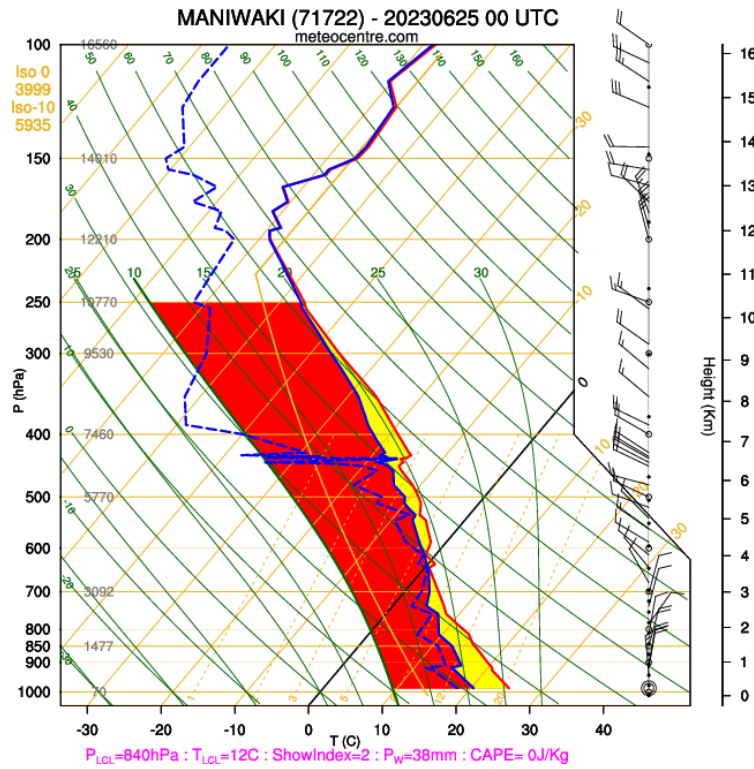
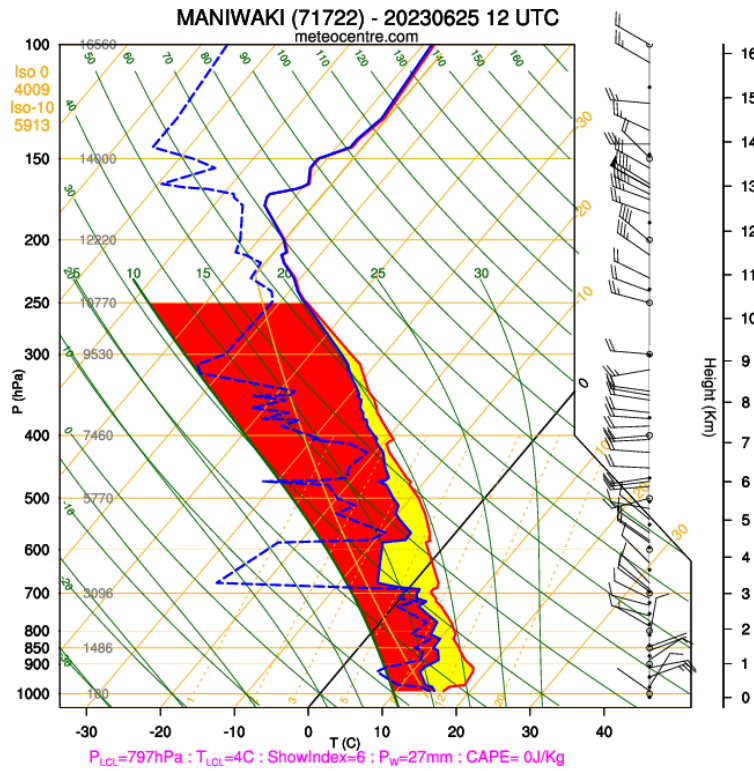


Figure 19. Radiosondage de Maniwaki le 25 juin 2023 12 TUC (metocentre.com)



Les 5 et 6 août 2021 montrent des concentrations élevées aux deux stations, soit entre 33,74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et 42,45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; un avis de smog était en vigueur les 6 août au matin et mettait en cause les incendies de forêt dans le nord-ouest de l'Ontario et au Manitoba. Le 5 août 2021, le sud du Québec connaissait une circulation d'air chaud du sud-ouest (Figure 20) et, le 6 août, une zone de haute pression s'est installée sur la côte est. Les données de radiosondage ne sont pas disponibles pour ces deux journées. La carte en altitude à 500 mb (6 août, 20 h; Figure 21) montre des vents en provenance de l'Ontario et du Manitoba, du moins à 500 mb; on ne dispose pas de cartes à plus basse altitude.

Cet exemple montre que le transport de particules fines peut s'effectuer sur de grandes distances, plus grandes que celles des régions qui sont souvent des sources de particules au nord-ouest. Par ailleurs, l'examen d'autres journées pourrait éventuellement révéler le transport sur de longues distances associées aux sources anthropiques de la partie nord-est des États-Unis et de l'Ontario.

Figure 20. Carte de surface du 6 août 2021 12 TUC (CMC Environnement Canada)

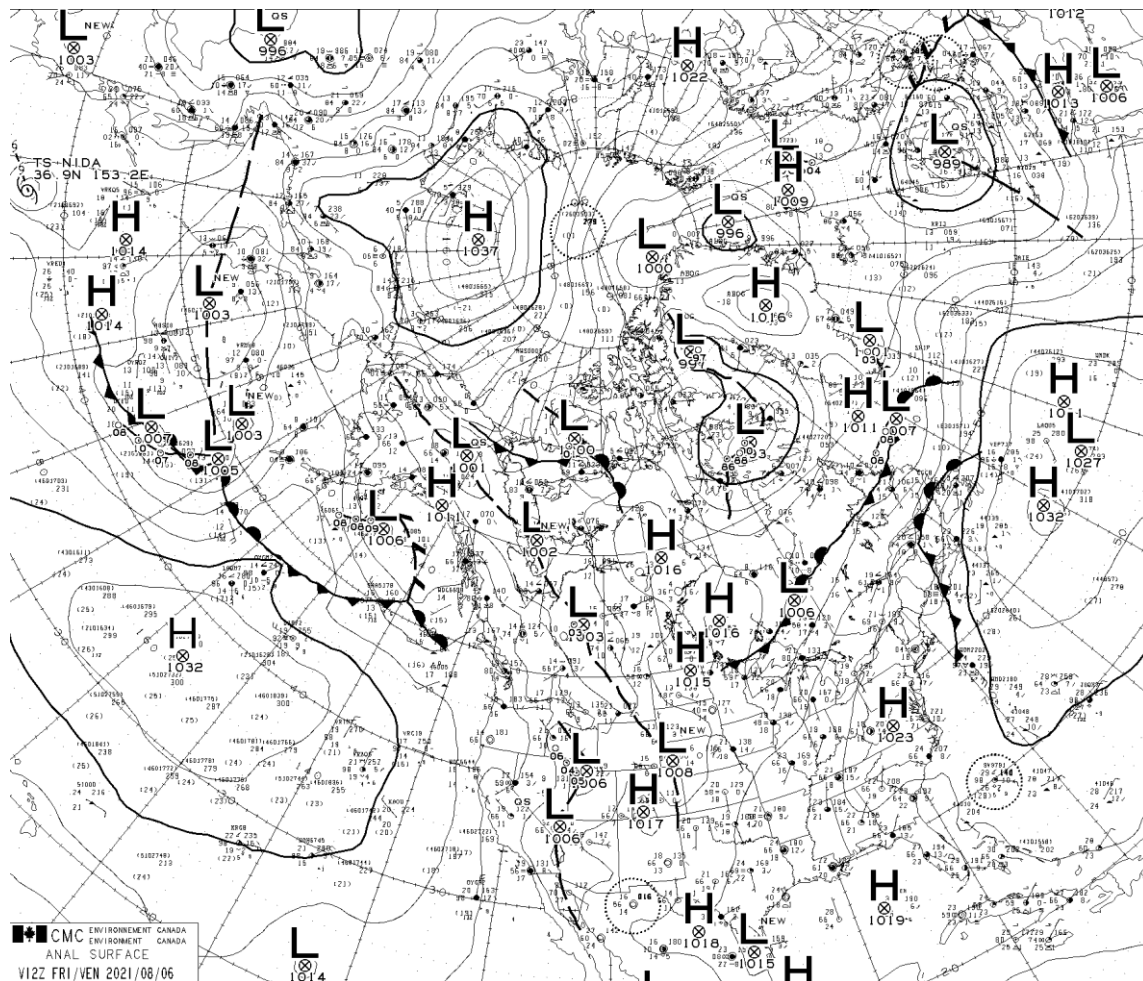
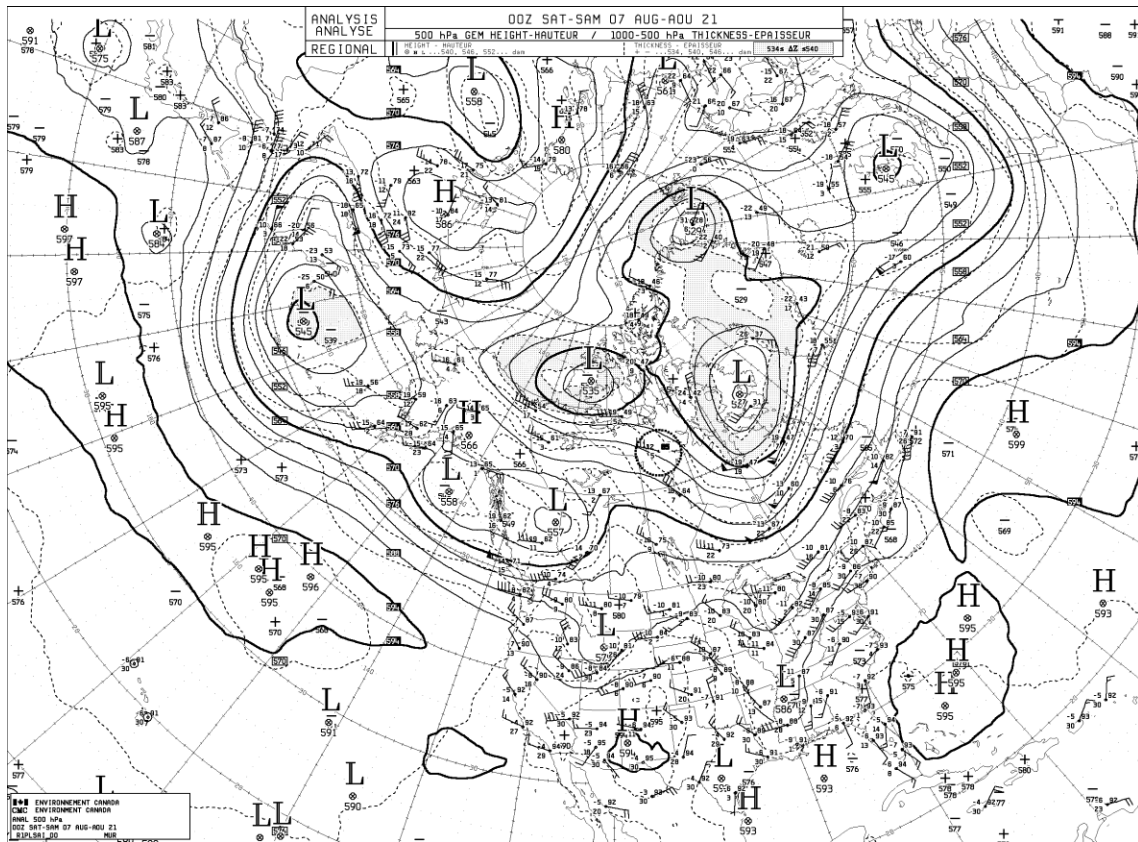


Figure 21. Carte en altitude à 500 mb le 7 août 2021 00 TUC (CMC Environnement Canada)



Par ailleurs, l'observateur à l'aéroport Jean-Lesage (Figure 22) rapporte une visibilité réduite à 6 milles (10 km) en direction sud-ouest, la présence de « brume sèche - HZ » et un vent faible (6 km/h). La prévision faite pour l'aéroport faisait état de fumée. La visibilité est ainsi un indicateur de la présence de particules.

Figure 22. Visibilité réduite par la fumée le 5 août 2021 à l'aéroport Jean-Lesage



8. CONCLUSION

Dans le but de caractériser les concentrations de particules fines et les conditions météorologiques, en particulier lorsqu'elles sont à la hausse, les valeurs mesurées dans deux stations de Québec, soit Vieux-Limoilou et École Primevères, ont été examinées.

Des statistiques descriptives ont été présentées, et la moyenne de $9,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à la station École Primevères est de 10 % plus élevée que celle à la station Vieux-Limoilou, qui est à $8,36 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Le seuil horaire de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ est dépassé au centile 90 aux deux stations, et le seuil horaire de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ l'est au centile 99 à Vieux-Limoilou et au centile 98 à École Primevères.

La répartition des concentrations horaires au-dessus du seuil de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ selon leur durée a également été examinée. À Vieux-Limoilou, la plus longue série au-dessus de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ est de 76 heures et de 28 heures pour le seuil de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$; à la station École Primevères, ces valeurs sont respectivement de 92 heures et de 49 heures.

Les fréquences de dépassements des seuils ont été obtenues. On constate que ces dépassements sont surtout associés à des conditions hivernales avec une température basse et des vents faibles, ainsi qu'à la présence d'une inversion de température. Des températures quotidiennes sous $1,4^\circ\text{C}$ et des vents de moins de $5,4 \text{ km/h}$ sont associés à des concentrations moyennes qui dépassent le seuil de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Dans le cas des incendies de forêt, on peut aussi retrouver la présence d'une inversion, et les conditions de vent en altitude doivent être propices au transport sur une distance plus ou moins grande selon la région d'origine des incendies.

L'analyse a porté sur quelques éléments météorologiques, et il demeure que la question des sources locales ainsi que l'apport de sources extérieures devraient être éventuellement considérés, mais ces éléments dépassent largement le cadre de cette note technique. L'ensemble des variables météorologiques et des sources sont éventuellement intégrées dans un modèle de transport et de transformation. Une analyse des séries chronologiques et une analyse multicomposante permettraient de mieux illustrer la structure des données.

Finalement, on remarque que les résultats présentés concernent deux stations de l'agglomération de Québec et que d'autres stations y sont présentes de même qu'en périphérie, par exemple à Deschambault (pour un niveau initial), ainsi que celles de l'Administration portuaire de Québec. Une analyse élargie permettrait de caractériser davantage les caractéristiques spatiotemporelles des concentrations de particules fines sur la région de Québec, et cette connaissance serait un élément permettant de mieux mettre en place des procédures de modélisation. Cela permettrait éventuellement de comprendre si les épisodes de Québec sont surtout de nature locale.

9. RÉFÉRENCES

Leduc, R. 1989 : *Le réseau de mesures des polluants atmosphériques en milieu forestier et agricole au Québec. Compte rendu* [séminaire sur le problème contemporain des oxydants, 27-28 février 1989, Vancouver].

Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP), 2023 : *Influence des feux de forêt de l'été 2023 sur la qualité de l'air au Québec. Rapport 2023*, 10 p.

Vallero, D., 2014 : *Fundamentals of air pollution*, 5^e édition, Academic Press, 986 p.

