

VARIABLES MICROMÉTÉOROLOGIQUES

ET MODÉLISATION DE LA DISPERSION ATMOSPHÉRIQUE

DANS DEUX RÉGIONS CLIMATIQUES AU QUÉBEC

Richard Leduc, Ph.D.
AirMet Science Inc.
rleduc@airmetscience.com

et

Jean-François Brière
Ministère de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques
Jean-Francois.Briere@environnement.gouv.qc.ca

octobre 2020

Table des matières

1	INTRODUCTION	8
2	DONNÉES NÉCESSAIRES AUX CALCULS	8
2.1	Température et nébulosité	10
2.2	Vent	11
2.3	Paramètres de surface	13
3	VARIABLES MICROMÉTÉOROLOGIQUES	14
3.1	Vitesse de frottement (u^*)	14
3.2	Flux de chaleur sensible (H)	16
3.3	Longueur d'Obukhov (L)	18
3.4	Vitesse convective (w^*)	20
3.5	Hauteurs de mélange (z_{ic} et z_{im})	23
4	MODÉLISATION	24
5	CONCLUSION	29
6	BIBLIOGRAPHIE	30
7	REMERCIEMENTS	30

Liste des figures

Figure 1. Localisation de Dorval, Maniwaki et Sept-Îles.....	10
Figure 2. Rose des vents à Sept-Îles et Maniwaki	13
Figure 3. Percentiles de la vitesse de frottement u^* (m/s) -Sept-Îles - Maniwaki.....	16
Figure 4. Percentiles du flux de chaleur sensible (W/m^2) - Sept-Îles - Maniwaki.....	17
Figure 5. Flux de chaleur sensible mensuel (W/m^2)	17
Figure 6. Percentiles de $1/L$ (m^{-1}) - Sept-Îles et Maniwaki	19
Figure 7. Percentiles de w^* (m/s) Sept-Îles et Maniwaki	21
Figure 8. Histogramme de w^* à Maniwaki pour les deux saisons.....	22
Figure 9. Histogramme de w^* à Maniwaki en saison chaude (mai à septembre) selon l'opacité	22
Figure 10. Percentiles de z_{im} (m) et z_{ic} (m)	24
Figure 11. Percentiles des concentrations horaires maximales.....	27
Figure 12. Percentiles des concentrations quotidiennes maximales.....	27
Figure 13. Percentiles des concentrations moyennes de la période.....	28

Liste des tableaux

Tableau 1. Coordonnées des stations.....	9
Tableau 2. Statistiques descriptives de la température ($^{\circ}C$)	10
Tableau 3. Fréquence (%) de l'opacité de la couverture nuageuse.....	11
Tableau 4. Statistiques descriptives pour la vitesse du vent (m/s)	12
Tableau 5. Fréquence (%) des directions et vitesses moyennes (m/s).....	12
Tableau 6. Moyennes des paramètres de surface	14
Tableau 7. Liste des variables calculées par le module AERMET	14
Tableau 8. Statistiques descriptives de la vitesse de frottement u^* (m/s).....	15
Tableau 9. Statistiques descriptives pour le flux de chaleur sensible (W/m^2).....	16
Tableau 10. Fréquences des classes de stabilité	18
Tableau 11. Statistiques descriptives pour w^* (m/s)	20
Tableau 12. Statistiques descriptives pour z_{ic} et z_{im} (m)	23
Tableau 13. Caractéristiques de la source ponctuelle	24
Tableau 14. Résumé des concentrations calculées à Maniwaki et Sept-Îles.....	26
Tableau 15. Fréquences (%) des cas de stabilité pour la concentration horaire maximale	28

RÉSUMÉ

Le modèle de dispersion AERMOD de l'US-EPA (2019a) est largement utilisé pour évaluer la concentration des contaminants dans l'air ambiant suite aux émissions d'une source. À cette fin, le modèle AERMOD requiert des variables micrométéorologiques caractérisant la turbulence (u^* , w^* , L , Z_{ic} , Z_{im}); elles sont calculées par le module AERMET et obtenues à l'aide de données locales de surface (vent, température et opacité de la couverture nuageuse) et en altitude. Les différences climatiques se répercuteront ainsi sur ces variables lesquelles influenceront la dispersion atmosphérique. Maniwaki et Sept-Îles, localisées dans deux régions climatiques différentes du Québec et séparées d'une distance d'environ 800 km, ont été choisies afin de comparer les variables micrométéorologiques et les résultats de la modélisation de la dispersion d'une source ponctuelle sur la période 2008-2012.

Sept-Îles est plus froid que Maniwaki avec une moyenne annuelle de 2.8°C comparativement à 5.5°C. Un ciel complètement dégagé est moins fréquent à Sept-Îles qu'à Maniwaki (17.04% vs 20.15%) et c'est l'inverse pour le ciel couvert (33.53% vs 30.54%). En excluant les vents calmes pour lesquels les calculs ne sont pas faits, la moyenne de la vitesse du vent à Sept-Îles est supérieure à celle de Maniwaki (4.49 m/s vs 2.24 m/s) de même que la vitesse de frottement (u^* ; 0.285 m/s vs 0.216 m/s). La latitude plus nordique, la plus grande nébulosité et la température plus basse de Sept-Îles font en sorte que la moyenne du flux de chaleur sensible y est inférieure (1.11 W/m² vs 16.47 W/m²). Afin de distinguer les conditions de stabilité, on a défini une plage de -0.015 m⁻¹ à 0.015 m⁻¹ pour représenter un cas neutre; la fréquence des cas neutres est d'environ 53% à Sept-Îles et 28% à Maniwaki alors que les cas convectifs (<-0.015 m⁻¹) sont davantage fréquents à Maniwaki (25% vs 16%) de même que les cas stables (>0.015 m⁻¹; 46% vs 31%). Ces résultats sont attribuables à une situation plus venteuse et plus nuageuse à Sept-Îles. À Maniwaki, la moyenne de la vitesse convective (w^*) est de 0.898 m/s et est plus élevée que celle de Sept-Îles à 0.712 m/s. La valeur de w^* étant fonction du flux de chaleur, la distribution de w^* selon deux saisons (mai à septembre et octobre à avril) montre une répartition très différente des valeurs aux deux endroits; il en est de même lorsque l'on partage les valeurs de w^* en saison chaude selon l'opacité de la couverture nuageuse. La moyenne de la hauteur de mélange convective est plus grande à Maniwaki qu'à Sept-Îles (647.3 m vs 519.6 m) et c'est l'inverse pour la hauteur de mélange mécanique (273.5 m vs 403.3 m).

Les variables micrométéorologiques de Maniwaki et Sept-Îles sont utilisées pour modéliser la dispersion atmosphérique (AERMOD) des émissions d'une source ponctuelle afin d'examiner comment celles-ci influencent les concentrations calculées à 4480 récepteurs sur la période de 5 ans.

À Maniwaki, la plus haute concentration horaire est de 103.69 µg/m³ comparativement à 90.43 µg/m³ à Sept-Îles (+14.7%). La moyenne des maxima horaires sur l'ensemble des récepteurs est aussi plus élevée à Maniwaki, soit 46.83 µg/m³ comparativement à 41.06 µg/m³ (+14%). Le plus haut percentile 99.5 horaire est de 62.92 µg/m³ à Maniwaki et de 47.86 µg/m³ à Sept-Îles (+31.5%). La moyenne de l'ensemble des récepteurs de même que la médiane sont plus élevées à Maniwaki (+42.8%, +27.7%). Le maximum du percentile 98 horaire est de 21% plus élevé à Maniwaki (44.12 µg/m³ vs 36.44 µg/m³); la moyenne et la médiane y sont aussi plus élevées

(+52.5%, +30.4%). En ce qui concerne les maxima quotidiens, Sept-Îles est à 30.73 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ comparativement à 43.09 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à Maniwaki (+40.2%); la moyenne et la médiane sont également rehaussés (+55.7%, +44.5%). La moyenne et la médiane du percentile 99.5 et 98 quotidien sont plus élevées à Maniwaki (environ +60%, +40%) mais les maxima ne diffère que de peu (1-2%). La moyenne maximale de la période est de 3.45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à Sept-Îles et de 4.29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à Maniwaki (+24.3%); sur l'ensemble des récepteurs Maniwaki a une moyenne de 83% plus élevée (0.97 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ vs 0.53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et une médiane de 31.1% plus élevée (0.59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ vs 0.45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Pour l'ensemble des récepteurs à Sept-Îles, la classe neutre est la plus souvent associée au maxima horaire (41%) et c'est la classe stable à Maniwaki (47%).

En conclusion, on a quantifié l'impact des différences climatiques entre Maniwaki et Sept-Îles sur les variables micrométéorologiques qui à leur tour influencent les résultats des calculs de dispersion atmosphériques.

ABSTRACT

The US-EPA (2019a) AERMOD dispersion model is widely used to assess the concentration of contaminants in ambient air as a result of emissions from a source. For this, AERMOD requires micrometeorological variables characterizing turbulence (u^* , w^* , L , Z_{ic} , Z_{im}); they are calculated by the module AERMET and obtained using upper air and local data (wind, temperature and cloud opacity). Climatic differences will thus affect these variables and influence atmospheric dispersion. Two stations (Maniwaki and Sept-Îles) located in two different climatic regions of Quebec and separated by a distance of about 800 km were selected in order to compare their micrometeorological variables and the results of the dispersion modeling from a point source emission for the 2008-2012 period.

Sept-Îles is colder than Maniwaki with an annual average of 2.8°C compared to 5.5°C. A clear sky is less frequent in Sept-Îles than at Maniwaki (17.04% vs 20.15%) and the opposite is true for a covered sky with an opacity of 10 (33.53% vs 30.54%). Excluding calm winds for which calculations are not made, the average wind speed in Sept-Îles is higher than at Maniwaki (4.49 m/s vs 2.24 m/s) and it is the same for the friction velocity (u^* ; 0.285 m/s vs 0.216 m/s). The higher latitude, the greater cloudiness and the lower temperature of Sept-Îles produce differences in the sensible heat flux (H) so that the average of Maniwaki is much higher (16.47 W/m² vs 1.11 W/m²). To distinguish between the stability conditions, a range of -0.015 m⁻¹ to 0.015 m⁻¹ was chosen for a neutral class; the frequency of neutral cases is 53% in Sept-Îles and 28% in Maniwaki, while convective cases (<-0.015 m⁻¹) are more frequent in Maniwaki (25% vs 16%) and also for the stable cases (> 0.015 m⁻¹; 46% vs 31%). These results are attributable to a windier and more cloudy situation in Sept-Îles. In Maniwaki, mean convective velocity scale (w^*) is higher than that of Sept-Îles (0.898 m/s vs 0.712 m/s). The value of w^* being a function of the heat flux, the distribution of w^* in two seasons (May to September and October to April) are very different for both places; it is the same when one segregates the values of w^* in the warm season according to the opacity of the cloud cover. The average convective mixing height is greater in Maniwaki (647.3 m vs 519.6 m) and it is the contrary for the mechanical mixing height (273.5 m vs 403.3 m).

The micrometeorological variables of Maniwaki and Sept-Îles are used to model (with AERMOD) the atmospheric dispersion of emissions from a point source in order to examine how they influence the concentrations calculated at 4481 receptors over the 5 years period.

In Maniwaki, the highest hourly concentration is 103.69 µg/m³ compared to 90.43 µg/m³ in Sept-Îles (+14.7%). The average hourly maxima for all receptors is 14% higher in Maniwaki (46.83 µg/m³ vs 41.06 µg/m³). The highest 99.5 hourly percentile is 62.92 µg/m³ in Maniwaki and 47.86 µg/m³ at Sept-Îles (+31.5%). The average of all receptors and the median are higher in Maniwaki than in Sept-Îles (+42.8%, +27.7%). The maximum of the 98 hourly percentile is 21% higher in Maniwaki (44.12 µg/m³ vs 30.44 µg/m³); the mean and median are also higher (+52.5%, +30.4%).

With respect to daily maxima, Sept-Îles is at 30.73 µg/m³ compared to 43.09 µg/m³ in Maniwaki (+40.2%); it is the same for the mean and the median (+55.7%, +44.5%). The average and

median daily 99.5 and 98 percentiles are higher in Maniwaki (about +60% and +40%) but the maxima are close (about 1-2%).

The maximum mean of the period is $3.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in Sept-Îles and $4.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in Maniwaki (+24.3%); over all receptors, Maniwaki has a mean 83% higher ($0.97 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vs $0.53 \mu\text{g}/\text{m}^3$) and the median is 131.1% higher ($0.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vs $0.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Over all the receptors in Maniwaki, 47% of the maximum hourly concentrations are associated with an stable case while in Sept-Îles, 41% are for a neutral case.

In conclusion, the impact of climatic differences between Dorval and Sept-Îles on micrometeorological variables has been quantified and these in their turn make the results of the dispersion modeling calculations different.

1 INTRODUCTION

La modélisation de la dispersion atmosphérique est une étape nécessaire afin d'évaluer l'impact attendu des émissions d'une installation (actuelle ou future) sur la qualité de l'air ambiant. Au Québec, le modèle de dispersion AERMOD de l'US-EPA (2019a) est le modèle largement utilisé à cette fin.

Pour effectuer les calculs de dispersion, le modèle AERMOD requiert des variables micrométéorologiques qui sont calculées par le module AERMET (EPA, 2019b) et qui permettent de caractériser la turbulence, de calculer des profils verticaux etc. et dont dépendent les concentrations estimées. Parmi celles-ci, on compte la longueur d'Obukhov (L), la vitesse de frottement (u^*), la vitesse d'échelle convective (w^*) et les hauteurs de mélange convective et mécanique (Z_{ic} , Z_{im}).

Les différences en ce qui concerne le climat devraient se répercuter sur plusieurs de ces variables et influencer les conditions de turbulence et la dispersion atmosphérique. L'objectif de ce texte est de présenter une comparaison des variables micrométéorologiques calculées par AERMET à deux stations localisées dans deux régions climatiques différentes du Québec; on compare aussi les résultats des calculs avec le modèle de dispersion AERMOD pour une source ponctuelle.

Les détails concernant les définitions et les calculs ne sont pas repris ici et se trouvent dans EPA (2019b).

La section 2 présente les données nécessaires aux calculs et les différences entre les deux stations, les variables micrométéorologiques sont comparées à la section 3, celles de la modélisation à la section 4 et la conclusion est présentée à la section 5.

2 DONNÉES NÉCESSAIRES AUX CALCULS

Les observations de surface requises par le module AERMET sont:

- des données de surface pour la température, la vitesse et la direction du vent (mesurées à la tour anémométrique de la station météorologique) et l'opacité de la couverture nuageuse, sur une base horaire ;
- des données aérologiques (profil de température, vent, pression, hauteur) sur une base quotidienne (sondage du matin).

Idéalement, ces observations (surface et altitude) devraient provenir d'une même station. Cependant, dans le sud du Québec, il n'y a que deux stations aérologiques, soit à Sept-Îles et Maniwaki. À Sept-Îles, on dispose aussi des observations locales de surface; à

Maniwaki, les observations de température, vitesse et direction du vent sont disponibles mais pas la nébulosité. Dans ce qui suit, on utilise les données suivantes:

- Sept-Îles: aérologiques locales et de surface locales (aéroport);
- Maniwaki: aérologiques locales, observations de température et de vent locales ; nébulosité observée à l'aéroport international PE-Trudeau (aussi appelé Dorval).

Dorval est la station la plus rapprochée de Maniwaki où des observations de nébulosité régulières sont disponibles et on suppose ici qu'elles sont représentatives de celles de Maniwaki.

Les coordonnées (UTM Universal Transverse Mercator et latitude, longitude) des stations sont au Tableau 1. Une distance d'environ 800 km sépare Sept-Îles des deux autres stations (Figure 1; source :Google Earth) et il y a environ 200 km entre Dorval et Maniwaki.

À Sept-Îles, une distance d'environ 2 km sépare la station aérologique de la tour où sont effectuées les observations de surface et à Maniwaki, celle-ci est de moins de 500 m.

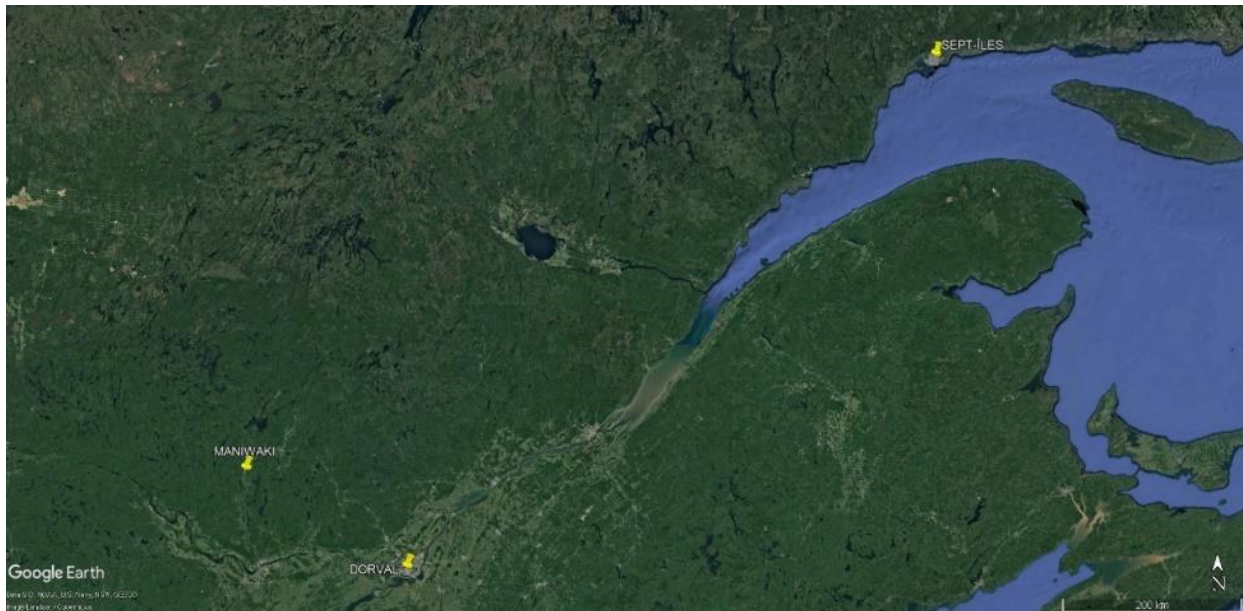
Selon Proulx *et al.* (1987), le climat de Maniwaki est du type subpolaire subhumide continental et celui de Sept-Îles est de type subpolaire subhumide intermédiaire (c'est-à-dire entre maritime et continental). Les précipitations annuelles totales moyennes sont d'environ 890 mm à Maniwaki et 1120 mm à Sept-Îles.

Les observations portent sur la période de 2008 à 2012.

Tableau 1. Coordonnées des stations

Station (2008-2012)	UTM X (m), UTM Y (m)	Latitude, Longitude
Dorval	597822E, 5035722N	45°28'05"N, -73°44'55"W
Maniwaki	423647E, 5125366N	46°16'39"N, -75°59'27"W
Sept-Îles	694983E, 5567088N	50°13'25"N, -66°15'59"W
Sept-îles aérologique	696781E, 5566522N	50°13'05"N, -66°14'29"W

Figure 1. Localisation de Dorval, Maniwaki et Sept-Îles



Toutes les données météorologiques nécessaires aux calculs (dont les normales climatiques) proviennent d'*Environnement et changement climatique Canada*.

Dans les sections suivantes, on présente les différences entre les deux stations en ce qui concerne la température, la nébulosité et le vent de même que les paramètres de surface dont dépendent aussi les variables micrométéorologiques.

2.1 Température et nébulosité

La température et l'opacité de la couverture nuageuse interviennent directement dans le bilan d'énergie; une différence entre les deux endroits devrait se répercuter dans les variables reliées à la convection.

Sept-Îles est plus froid que Maniwaki (Tableau 2), avec une moyenne de 2.8°C comparativement à 5.5°C. La plus haute température horaire ne dépasse pas 30°C à Sept-Îles alors qu'elle est de 34.5°C à Maniwaki; le minimum absolu (basé sur les températures horaires) est un peu plus faible à Maniwaki (-37.6°C vs -35.0°C).

Tableau 2. Statistiques descriptives de la température (°C)

Température (°C) 2008-2012	Sept-Îles	Maniwaki
Nombre	43836	43848
Moyenne	2.8	5.5
Écart-type	10.8	12.2

Température (°C) 2008-2012	Sept-Îles	Maniwaki
Maximum	29.2	34.5
Médiane	3.7	6.3
Minimum	-35.0	-37.6

Le Tableau 3 donne les fréquences de l'opacité de la couverture nuageuse (de 0 à 10); on peut y constater qu'un ciel dégagé (opacité à 0) est moins fréquent à Sept-Îles qu'à Dorval (17.0% vs 20.2%) et c'est l'inverse pour le ciel couvert (33.5% vs 30.5%). Les fréquences de 0 à 4 sont de 41.8% à Sept-Îles et de 45.1% à Dorval; celles de 6 à 10 sont de 54.5% à Sept-Îles et de 51% à Dorval. Dans son ensemble, la nébulosité est ainsi plus présente à Sept-Îles qu'à Dorval.

Tableau 3. Fréquence (%) de l'opacité de la couverture nuageuse

Opacité 2008-2012	Pourcentage (%)	
	Maniwaki (Dorval)	Sept-Îles
0	20.2	17.0
1	10.0	8.6
2	5.6	6.6
3	4.9	5.2
4	4.4	4.4
5	4.0	3.7
6	3.5	3.4
7	3.8	4.1
8	4.7	4.7
9	8.5	8.8
10	30.5	33.5

2.2 Vent

La vitesse intervient dans le calcul de la vitesse de frottement laquelle influence la longueur d'Obukhov qui caractérise la stabilité. Les différences du régime éolien entre les deux stations devraient ainsi se répercuter sur ces variables.

En moyenne, Sept-Îles est plus venteux que Maniwaki soit 3.90 m/s comparativement à 2.10 m/s (Tableau 4). La fréquence de CALME est plus élevée à Sept-Îles (13% vs 6.5%). La vitesse moyenne de Maniwaki, avec ou sans les CALME est environ deux fois inférieure à celle de Sept-Îles.

Tableau 4. Statistiques descriptives pour la vitesse du vent (m/s)

Vitesse (m/s) 2008-2012	Sept-Îles		Maniwaki	
	avec CALME		excluant CALME	
N	43836	43847	38125	40990
Moyenne	3.90	2.10	4.49	2.24
Écart-type	2.62	1.44	2.29	1.38
Maximum	23.7	13.4	23.7	13.4
Médiane	3.60	2.10	4.10	2.10
CALME (%)	13.0	6.5		

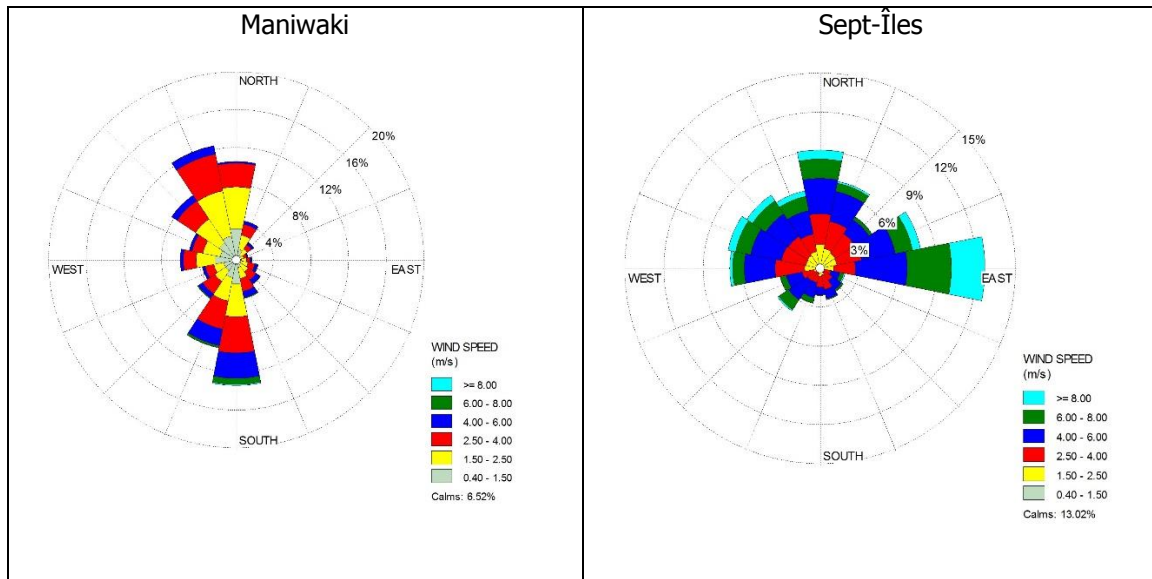
À Sept-Îles (Figure 2), la direction E est la plus fréquente à 12.6% et aussi la plus venteuse avec une moyenne de 6.0 m/s. La direction N montre aussi une fréquence plus élevée à 9.1%; les directions WNW à N ont une vitesse moyenne qui ne diffère pas beaucoup, autour de 4.5 m/s.

Tableau 5. Fréquence (%) des directions et vitesses moyennes (m/s)

2008-2012	Vitesse moyenne (m/s)		2008-2012	Vitesse moyenne (m/s)	
	Sept-Îles	Maniwaki		Sept-Îles	Maniwaki
Direction	Sept-Îles	Maniwaki	Direction	Sept-Îles	Maniwaki
N	4.5	1.8	S	3.2	2.8
NNE	3.8	2.0	SSW	4.3	2.7
NE	3.3	2.2	SW	4.7	2.4
ENE	4.6	2.1	WSW	4.2	1.9
E	6.0	2.0	W	4.1	1.8
ESE	4.3	2.3	WNW	4.6	1.8
SE	3.8	2.5	NW	4.6	2.1
SSE	3.3	2.6	NNW	4.4	2.1

À Maniwaki (Figure 2), la direction dominante est NNW avec 13.5% suivie du S (10.1%), du SSW (10.8%) et du NNW (9.5%); ces trois directions comptent pour environ 44% des observations. Les vitesses moyennes sont autour de 2 m/s du WSW à l'EST et le maximum est à 2.8 m/s (S).

Figure 2. Rose des vents à Sept-Îles et Maniwaki



2.3 Paramètres de surface

Afin de calculer les variables micrométéorologiques, on caractérise la surface terrestre à l'aide de paramètres qui interviennent dans le bilan d'énergie, soit l'albédo et le rapport de Bowen sur une région de 10 km x 10 km; la rugosité (z_0) est calculée à partir des caractéristiques de la surface de 1 km de rayon centrée aussi sur la tour météorologique. Les valeurs de ces paramètres dépendent de l'utilisation du sol et de la saison; on les retrouve dans le document de référence de EPA (2008).

À Sept-Îles, la région de 10 km par 10 km est couverte par une forêt (environ 40% de la surface) et le fleuve dans la partie sud (environ 30%). La tour météorologique de Sept-Îles est localisée au centre des pistes d'atterrissage à environ 1.5 km au nord du fleuve St-Laurent. Dans un rayon de 1 km, les pistes et les surfaces adjacentes gazonnées occupent la majorité de la surface.

À Maniwaki, dans la région de 10 km par 10 km, environ 70% de la surface est occupée par la forêt. Dans un rayon de 1 km de la tour météorologique, la forêt couvre environ 55% de la surface. Le paramètre de rugosité y est par conséquent très différent de celui de Sept-Îles.

Les valeurs de l'albédo sont semblables alors que celles du rapport de Bowen sont différentes à cause de la différence entre les utilisations du sol à Sept-Îles et Maniwaki.

Tableau 6. Moyennes des paramètres de surface

Paramètre	Sept-Îles	Maniwaki
Rugosité (m)	0.0197	0.1580
Albédo	0.23	0.25
Rapport de Bowen	0.33	0.52

3 VARIABLES MICROMÉTÉOROLOGIQUES

À partir des observations de surface et en altitude et des paramètres de surface, le module AERMET calcule les variables micrométéorologiques listées au Tableau 7 sur une base horaire mais pas pour un vent calme; elles sont comparées dans les sections qui suivent. Les détails des calculs sont dans le document de référence du modèle AERMOD (EPA, 2019a).

Tableau 7. Liste des variables calculées par le module AERMET

Variable	Description	Variable	Description
H (W/m ²)	flux de chaleur sensible	u* (m/s)	vitesse de frottement
w* (m/s)	échelle de vitesse convective	L (m)	longueur d'Obukhov
z _{ic} (m)	hauteur de mélange convective	z _{im} (m)	hauteur de mélange mécanique

Pour comparer les variables entre les deux stations, on utilise (outre les statistiques descriptives) un diagramme quantile-quantile ("Q-Q plot") en prenant les valeurs aux percentiles 1% (le premier point), 2%, 5%, 10%, 15%,..., 95%, 98%, 99.5% et 100% (le dernier point) et on y trace aussi une ligne représentant les valeurs égales.

3.1 Vitesse de frottement (u*)

La vitesse de frottement représente la composante mécanique de la turbulence; elle est associée au cisaillement dû au frottement de l'air sur les obstacles au sol (via le paramètre de rugosité).

En moyenne (Tableau 8) la vitesse de frottement est plus grande à Sept-Îles (0.285 m/s) qu'à Maniwaki (0.216 m/s), où la vitesse moyenne excluant les CALME est plus faible. Il en est de même de la médiane et du maximum.

Tableau 8. Statistiques descriptives de la vitesse de frottement u^* (m/s)

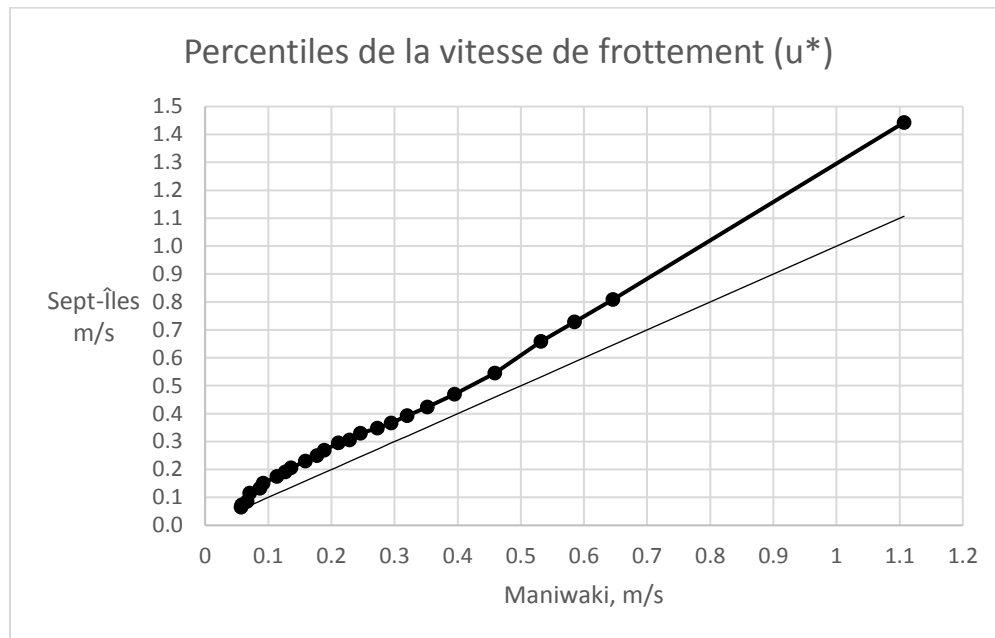
u^* (m/s)	Sept-Îles	Maniwaki
Nombre	38125	40990
Moyenne	0.285	0.216
Écart-type	0.146	0.128
Médiane	0.269	0.189
Maximum	1.443	1.107

La valeur calculée de u^* dépend de la vitesse et une régression linéaire donne à Sept-Îles $u^*=0.0633u$ ($r^2=0.993$) et $u^*=0.0929u$ à Maniwaki ($r^2=0.951$) où u est la vitesse du vent. Le valeur plus élevée de r^2 à Sept-Îles est probablement attribuable au fait que la rugosité est plus uniforme autour de la station en raison de la présence des grandes surfaces bétonnées et gazonnées alors qu'à Maniwaki le côté ouest (davantage forestier) diffère passablement du côté est (champs, pistes à proximité). Compte-tenu de ce lien, on retrouve généralement les valeurs moyennes les plus élevées de u^* dans les directions les plus venteuses.

Le coefficient de corrélation de u^* est de 0.232 et celui de la vitesse est de 0.184 entre Sept-Îles et Maniwaki. Ces faibles valeurs s'expliquent par le fait que les deux endroits ne sont pas influencés au même moment par les mêmes conditions météorologiques compte-tenu de la distance qui les sépare et que d'autres effets locaux peuvent intervenir à Sept-Îles (comme une brise de mer) mais pas Maniwaki.

La distribution des percentiles des u^* montre des valeurs systématiquement supérieures à Sept-Îles par rapport à celle de Maniwaki (Figure 3).

Figure 3. Percentiles de la vitesse de frottement u^* (m/s) -Sept-Îles - Maniwaki



3.2 Flux de chaleur sensible (H)

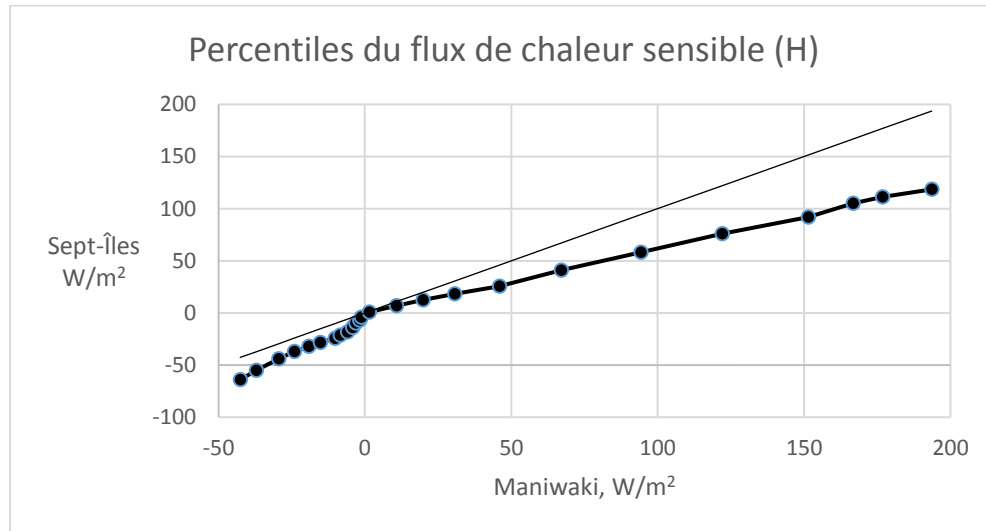
Le flux de chaleur sensible (H , W/m^2) dépend du rayonnement net, lui-même fonction de la nébulosité et de la température et, durant le jour, du rayonnement solaire. La latitude plus nordique, la plus grande nébulosité et la température plus basse de Sept-Îles par rapport à Maniwaki causent une différence importante comme on peut le constater au Tableau 9; la moyenne de $16.47 W/m^2$ de Maniwaki est largement supérieure à celle de Sept-Îles ($1.11 W/m^2$), comme le maximum et la médiane. La valeur minimale de $-64 W/m^2$ est la valeur minimale attribuée par AERMET.

Tableau 9. Statistiques descriptives pour le flux de chaleur sensible (W/m^2)

H (W/m^2)	Sept-Îles	Maniwaki
Nombre	38130	40990
Moyenne	1.11	16.47
Écart-type	36.20	46.75
Médiane	-6.9	-1.8
Maximum	118.5	193.6
Minimum	-64.0	-64.0

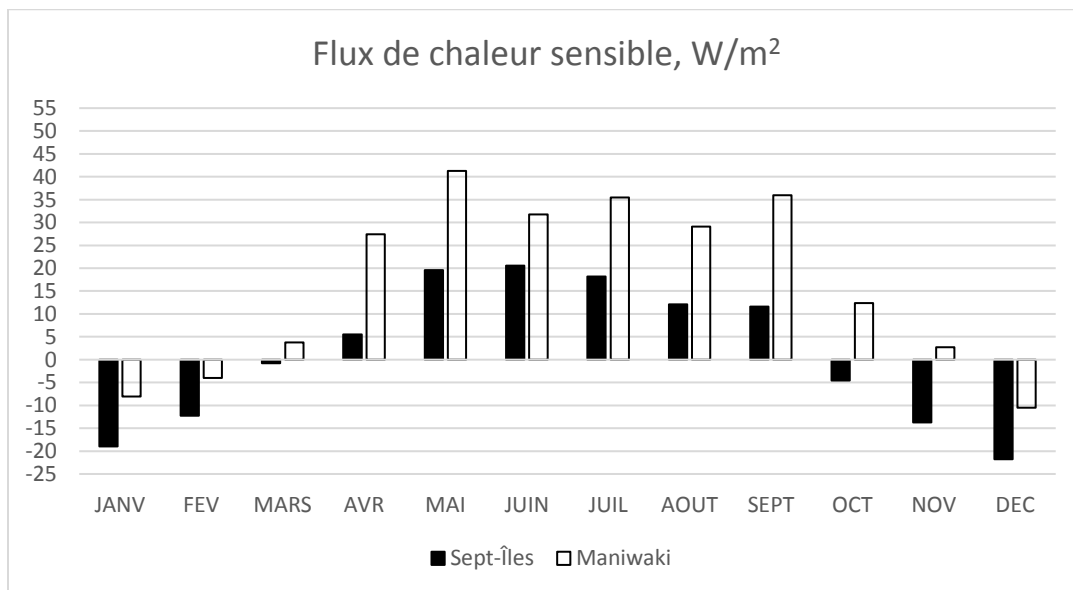
La distribution des valeurs de H (Figure 4) montre aussi la différence entre les deux endroits; les percentiles ne diffèrent pas beaucoup pour les basses valeurs avec $H < 0 \text{ W/m}^2$ (correspondant au percentile 60%) mais l'écart s'accroît par la suite.

Figure 4. Percentiles du flux de chaleur sensible (W/m^2) - Sept-Îles - Maniwaki



Maniwaki a des flux de chaleurs supérieurs à ceux de Sept-Îles en saison chaude et moins négatifs en saison froide (Figure 5). On note qu'en mars et en octobre-novembre, le flux moyen est encore positif à Maniwaki mais il est négatif à Sept-Îles.

Figure 5. Flux de chaleur sensible mensuel (W/m^2)



3.3 Longueur d'Obukhov (L)

La longueur d'Obukhov (L) dépend du rapport entre la composante mécanique (par le biais de u^*) et de la composante thermique (par le biais du flux de chaleur sensible H) de la turbulence. Outre l'influence du régime éolien local, d'autres variables interviennent comme par exemple, la température, la nébulosité, la latitude, la couverture du sol, etc. et qui déterminent la valeur de H. Le paramètre de stabilité est $1/L$ (m^{-1}).

Une limite de $L = \pm 8888$ m est assignée dans AERMET dans les cas où $abs(L)$ (stable ou convectif) est très grand et de même, si $abs(L) < 1$ m, on applique la limite $L = \pm 1$ m selon le cas; on donne la fréquence de ces cas au Tableau 10.

Les fréquences respectives de cas convectifs ($1/L < 0$) et stables ($1/L > 0$) ne sont pas très différentes globalement (Tableau 10) mais ceci est dû au fait que des cas avec des valeurs très faiblement négatives ou positives sont comptées comme convectives ou stables alors qu'ils représentent davantage des cas neutres.

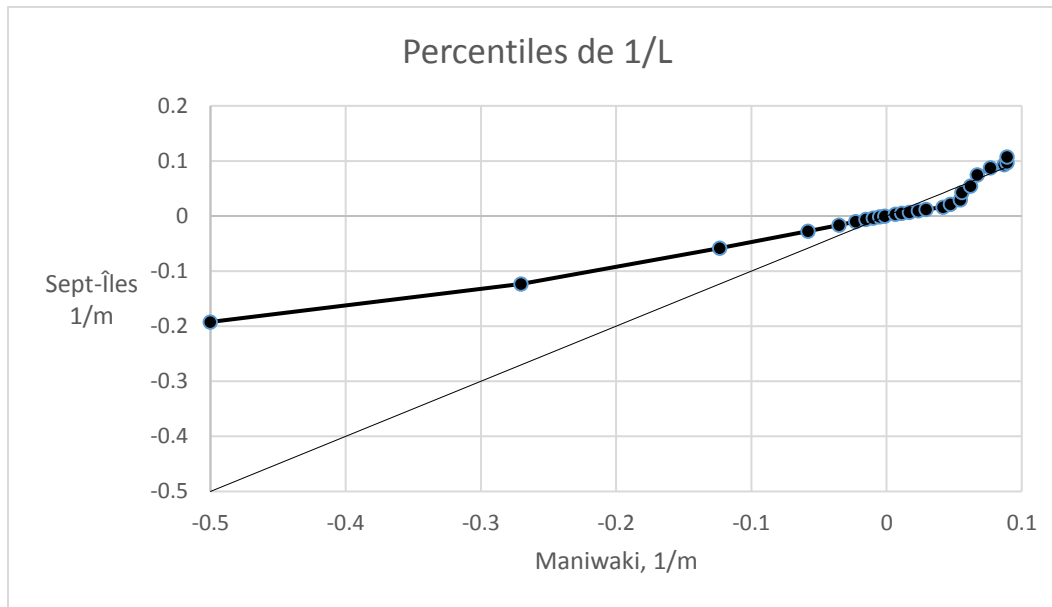
Pour distinguer les conditions de stabilité, on a choisi une plage de $-0.015 m^{-1}$ à $0.015 m^{-1}$ qui est représentative d'une classe neutre d'après le diagramme de Golder (tiré de Panofsky et Dutton, 1984). La fréquence globale des cas neutres (Tableau 10) est de plus de 50% à Sept-Îles (52.81%) et de moins de 30% à Maniwaki (28.37%); les cas convectifs sont davantage fréquents à Maniwaki (environ 25% vs 16%). Les cas stables sont les plus fréquents à Maniwaki (46%) et sont un peu au-dessus de 30% à Sept-Îles. Ces résultats sont attribuables à une situation plus venteuse et plus nuageuse à Sept-Îles.

Tableau 10. Fréquences des classes de stabilité

1/L (m^{-1})	Sept-Îles	Maniwaki
Nombre d'observations	38125	40990
Fréquence (%)		
1/L < 0	41.04	41.35
1/L > 0	58.96	58.65
1/L < -0.015	15.96	25.20
-0.015 <= 1/L <= 0.015	52.81	28.37
1/L > 0.015	31.24	46.43
$L = -8888 / L = +8888$	0.54 / 0.06	0.15 / 0.02
$L = -1 / L = +1$	0.02 / 0	0.31 / 0
$ABS(z_{ref}/L) < 2$	99.16	97.07
$ABS(z_{ref}/L) \geq 2$	0.84	2.93
$z_{ref}/L > 2$	0	0

La distribution des valeurs de $1/L$ (Figure 6) montre des valeurs à Sept-Îles qui sont beaucoup moins négatives que celles de Maniwaki jusqu'au percentile 45% puis les valeurs positives de Maniwaki sont supérieures à celles de Sept-Îles jusqu'au percentile 90% et par la suite celle de Sept-Îles redeviennent légèrement supérieures.

Figure 6. Percentiles de $1/L$ (m^{-1}) - Sept-Îles et Maniwaki



Barnéoud (2016) a examiné la répartition des valeurs de $1/L$ utilisées dans le modèle de dispersion atmosphérique MLCD ("Modèle Lagrangien de Courte Distance") et a constaté que 20% à 30% des valeurs sont en dehors de la plage de validité d'application de la théorie de la similitude i.e. $|z/L| < 2$; la valeur calculée (dans le MLCD) pour L est pour une hauteur de 40 m de sorte que $|L| < 20$ m. En ce qui concerne les deux stations, la hauteur de calcul (z_{ref}) est de 10 m et ainsi $|L| < 5$ m. Il n'y a aucune valeur de $z_{ref}/L > 2$; il y a à Sept-Îles 0.84% des valeurs de z_{ref}/L qui sont inférieures à -2 et 2.93% à Maniwaki (Tableau 10). La différence entre les résultats du MLCD et ceux aux deux stations est due au fait que les vitesses de vent et de frottement calculées par le modèle météorologique (fournissant les valeurs au MLCD) peuvent devenir très petites mais non nulles ce qui induit des valeurs de L (et de u^*) qui sont trop faibles alors que pour Maniwaki et Sept-Îles, les vitesses sont au minimum 1 m/s.

Les fréquences des cas convectifs ($< -0.015 m^{-1}$) à Sept-Îles sont inférieures à celles de Maniwaki pour chaque mois de l'année (entre 3% et 32% vs 8% et 41%). Les cas stables ($> 0.015 m^{-1}$) sont plus fréquents à Maniwaki qu'à Sept-Îles pour chaque mois de l'année (de 33% à 64% vs de 20% à 43%); il en est de même des fréquences des cas neutres qui

sont passablement plus élevées à Sept-Îles (entre 42% et 60% vs entre 14% et 39%). On note aussi une fréquence faible mais non-nulle de cas convectifs en hiver aux deux endroits.

Dans cette classification il n'y a pas de cas convectifs de 20 h à 4 h; il y en a à 5 h à Sept-Îles (0.13%) mais pas à Maniwaki. À midi, il n'y a pas de cas stable et les cas convectifs sont plus fréquents à midi à Maniwaki (62%) et qu'à Sept-Îles (43%). À chaque heure, il y a plus de 75% de cas stables la nuit entre 20 h et 6 h à Maniwaki mais les fréquences durant ces heures à Sept-Îles sont plus faibles soit entre 20% et 60% car les cas neutres y sont plus présents.

3.4 Vitesse convective (w^*)

Pour caractériser la turbulence en conditions convectives, on calcule une vitesse verticale w^* qui dépend de u^* , de L et de la hauteur de mélange convective qui est calculée d'heure en heure.

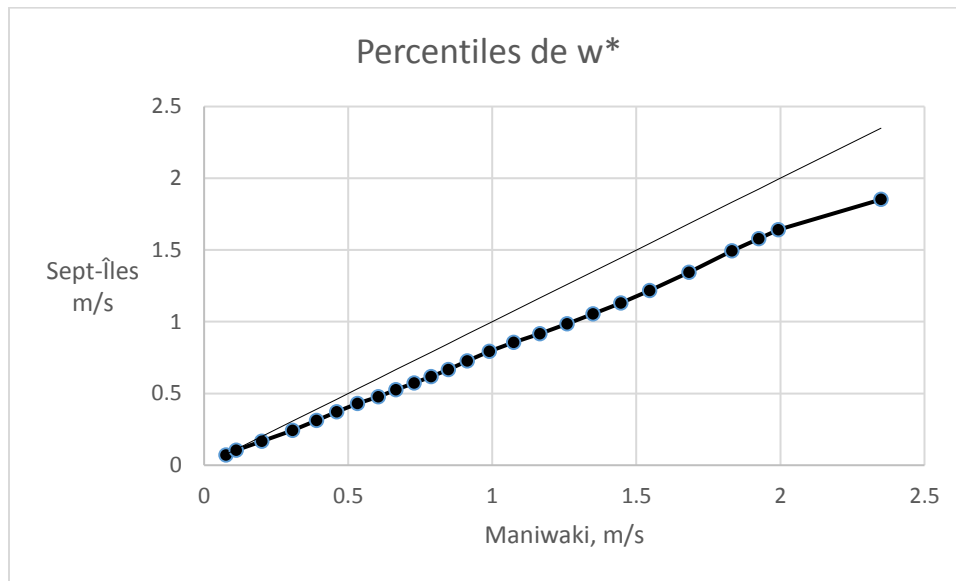
À Maniwaki (Tableau 11), la moyenne de w^* est de 0.898 m/s et à Sept-Îles de 0.712 m/s; comme on l'a vu précédemment, le flux de chaleur sensible est aussi plus grand à Maniwaki qu'à Sept-Îles. La médiane et la valeur maximale sont aussi plus grandes à Maniwaki.

Tableau 11. Statistiques descriptives pour w^* (m/s)

w^* (m/s)	Sept-Îles	Maniwaki
Nombre	15635	16851
Moyenne	0.712	0.898
Écart-type	0.366	0.462
Médiane	0.666	0.848
Maximum	1.852	2.349
Minimum	0.009	0.004

La distribution des valeurs est plus étendue à Maniwaki qu'à Sept-Îles; on peut aussi constater la différence entre les deux endroits avec les valeurs aux percentiles (Figure 7), Maniwaki étant toujours supérieur.

Figure 7. Percentiles de w^* (m/s) Sept-Îles et Maniwaki



La valeur de w^* étant fonction du flux de chaleur (H), la distribution de w^* selon deux saisons (mai à septembre et octobre à avril) montre une répartition très différente des valeurs comme on peut le constater à la Figure 8. À Maniwaki, dans la saison chaude, on note des fréquences semblables entre 1.1 m/s et 1.6 m/s et un maximum autour de 0.8 m/s. Dans la saison froide, la distribution a un maximum autour de 0.4-0.5 m/s puis elle diminue graduellement. Pour illustrer l'effet de la nébulosité, on partage l'opacité de la couverture nuageuse en saison chaude en deux groupes soit inférieure ou égale à 5 et supérieure à 5; la distribution des w^* est aussi partagée nettement entre ces deux groupes (Figure 9). En effet, pour le premier groupe, les fréquences augmentent jusqu'à environ 1.5-1.6 m/s puis diminuent rapidement alors qu'avec une plus grande opacité, on note un maximum à 0.7-0.8 m/s puis une diminution graduelle.

Figure 8. Histogramme de w^* à Maniwaki pour les deux saisons

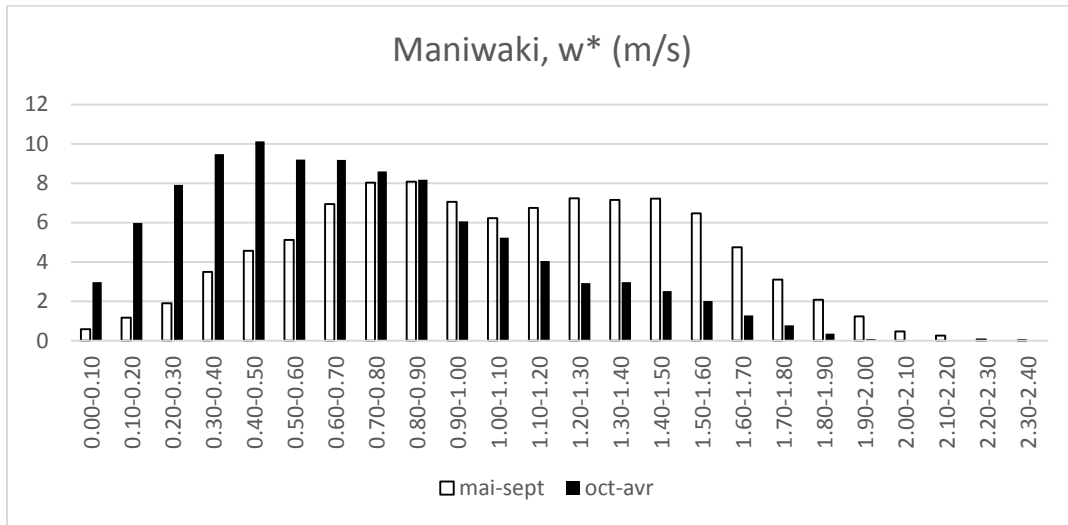
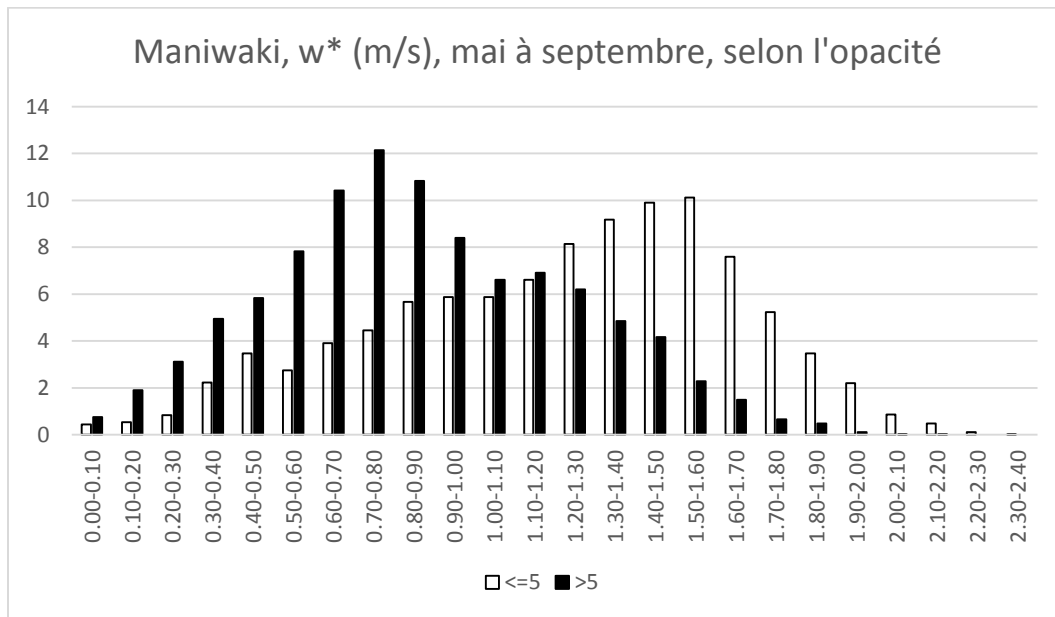


Figure 9. Histogramme de w^* à Maniwaki en saison chaude (mai à septembre) selon l'opacité



À Sept-Îles, la répartition des valeurs de w^* est également différente selon les mêmes saisons et l'histogramme (non illustré) ressemble à celui de Maniwaki; en saison froide, le maximum est à 0.4 m/s puis les fréquences diminuent de manière continue; en saison chaude, un maximum s'observe à 0.5-0.7 m/s et des valeurs plutôt stables autour de 1 m/s suivies d'une décroissance.

Également, dans la saison chaude, les distributions sont aussi différentes selon l'opacité de la couverture nuageuse et l'histogramme ressemble aussi à celui de Maniwaki; le maximum est à 0.5-0.6 m/s avec une opacité de plus de 5 mais à 1.1-1.2 m/s avec une opacité de 5 et moins.

3.5 Hauteurs de mélange (z_{ic} et z_{im})

Deux hauteurs de mélange sont calculées dans AERMET, soit la hauteur convective (z_{ic}) et la hauteur mécanique (z_{im}).

La hauteur de mélange mécanique est directement reliée à u^* avec $z_{im}=2400u^{*1.5}$. La valeur de z_{ic} est calculée d'heure en heure à partir du profil matinal de température potentielle et de l'apport de chaleur sensible (H). Le sondage est utilisé pour déterminer la hauteur à laquelle la quantité de chaleur est suffisante pour rendre le profil adiabatique. Le régime éolien local et les caractéristiques du flux de chaleur sensible influenceront ainsi les caractéristiques de z_{im} et de z_{ic} .

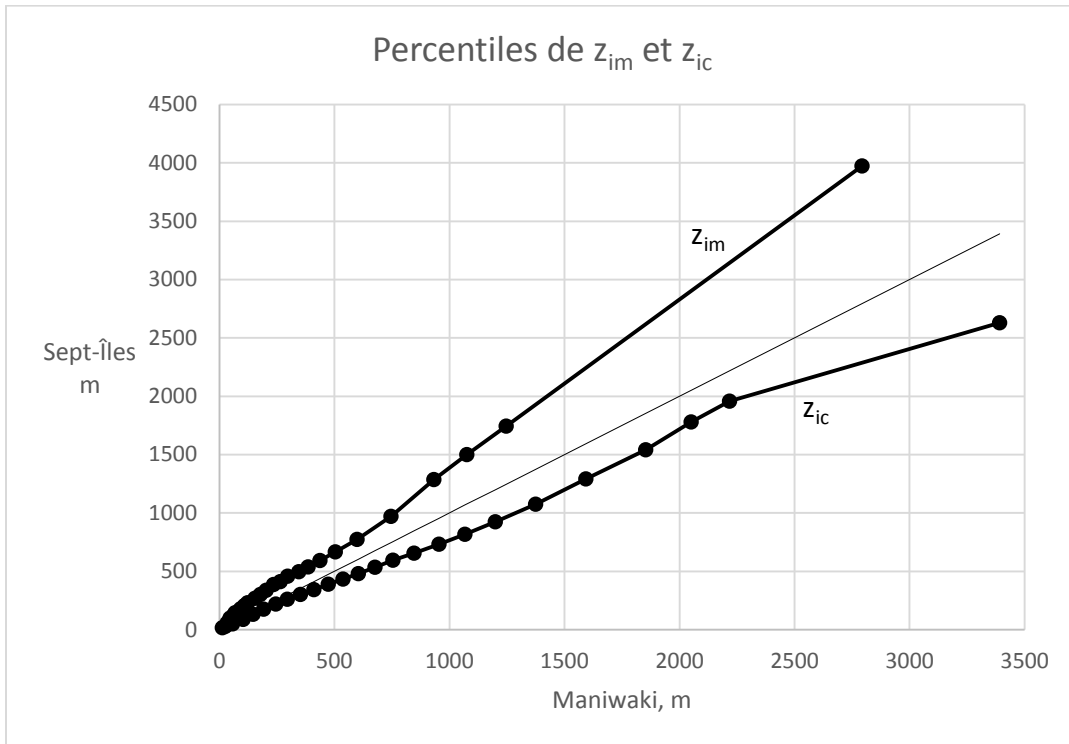
La moyenne de la hauteur de mélange convective est supérieure à Maniwaki (647.3 m vs 519.6 m); il en est de même pour la médiane et le maximum. À Sept-Îles, la hauteur de mélange mécanique est plus élevée (403.3 m) qu'à Maniwaki (273.5 m) car u^* y est plus grand.

Tableau 12. Statistiques descriptives pour z_{ic} et z_{im} (m)

m	z_{ic}	z_{im}	z_{ic}	z_{im}
	Sept-Îles		Maniwaki	
Nombre	15640	38125	16912	40990
Moyenne	519.6	403.3	647.3	273.5
Écart-type	396.5	308.3	496.2	239.8
Médiane	433.0	337.0	538	203
Maximum	2629	3973	3391	2794
Minimum	1	15	0	13

Les divers percentiles montrent des valeurs de z_{ic} toutes plus élevées à Maniwaki qu'à Sept-Îles (Figure 10), et à l'inverse pour z_{im} .

Figure 10. Percentiles de z_{im} (m) et z_{ic} (m)



4 MODÉLISATION

Les variables micrométéorologiques de Maniwaki et Sept-Îles sont utilisées pour modéliser la dispersion atmosphérique des émissions d'une source ponctuelle afin d'examiner comment celles-ci influencent les concentrations calculées à l'aide du modèle AERMOD.

Les caractéristiques de la source ponctuelle sont au Tableau 13.

Tableau 13. Caractéristiques de la source ponctuelle

Variables	Valeurs
Hauteur (m)	15
Dimension à la sortie (m)	0.5
Vitesse de sortie de l'effluent (m/s)	10
Température (°C) à la sortie	50
Taux d'émission (g/s)	1

Le domaine de modélisation est plat et d'une dimension de 4.2 km par 4.2 km centré sur la source. La grille de calcul compte 4480 récepteurs (points de grille) disposés tous les 50 m jusqu'à 1 km puis tous les 100 m.

Dans les études de modélisation, les concentrations d'intérêt sont les valeurs maximales sur diverses périodes; ici, on considère la période horaire, quotidienne et la moyenne sur la période complète (de 5 ans). On considère aussi les concentrations aux percentiles 99.5% (P99.5) et 98% (P98).

Sur la base horaire, les résultats sont obtenus avec les concentrations maximales de chaque récepteur calculées avec les cinq années de données météorologiques (43848 concentrations par récepteur pour 5 ans). Il en est de même pour les concentrations quotidiennes (1827 concentrations moyennes quotidiennes par récepteurs pour 5 ans). Les résultats sont au Tableau 14.

À Maniwaki, la plus haute concentration horaire (parmi les 4480 maxima) est de 103.69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ comparativement à 90.43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à Sept-Îles (+14.7%). La moyenne des maxima horaires sur l'ensemble des récepteurs est aussi plus élevée à Maniwaki, soit 46.83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ comparativement à 41.06 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (+14%). La Figure 11 illustre les percentiles des maxima horaires avec les valeurs plus élevées à Maniwaki. Les maxima horaires individuels montrent une corrélation significative de $r=0.89$.

Le plus haut P99.5 horaire est de 62.92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à Maniwaki et de 47.86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à Sept-Îles (+31.5%). La moyenne de l'ensemble des récepteurs de même que la médiane sont plus élevées à Maniwaki (+42.8%, +27.7%). Le maximum de P98 horaire est de 21% plus élevé à Maniwaki (44.12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ vs 36.44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$); la moyenne et la médiane du P98 sont aussi plus élevées à Maniwaki (+52.5%, +30.4%).

En ce qui concerne les maxima quotidiens, Sept-Îles est à 30.73 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ comparativement à 43.09 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à Maniwaki (+40.2%); il en est de même pour la moyenne et la médiane (+55.7%, +44.5%). La moyenne et la médiane de P99.5 et P98 quotidien sont plus élevées à Maniwaki (environ +60%, +40%); Sept-Îles est à 1-2% de plus pour les deux maxima. La distribution des maxima quotidiens (Figure 12) montrent des valeurs plus élevées à Maniwaki. La corrélation entre les moyennes quotidiennes est significative avec $r=0.65$.

Tableau 14. Résumé des concentrations calculées à Maniwaki et Sept-Îles

Concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) N=4480 récepteurs	Moyenne	Écart-type	Médiane	Maximum
Maniwaki maximum horaire	46.83	21.97	39.77	103.69
Sept-Îles maximum horaire	41.06	18.74	36.18	90.43
Maniwaki maximum quotidien	11.63	8.01	8.93	43.09
Sept-Îles maximum quotidien	7.47	4.86	6.18	30.73
Maniwaki moyenne période	0.97	0.95	0.59	4.29
Sept-Îles moyenne période	0.53	0.42	0.45	3.45
Maniwaki P99.5 horaire	23.44	14.20	20.86	62.92
Sept-Îles P99.5 horaire	16.41	10.89	16.33	47.86
Maniwaki P98 horaire	11.33	10.89	7.50	44.12
Sept-Îles P98 horaire	7.43	6.59	5.75	36.44
Maniwaki P99.5 quotidien	7.41	5.65	5.42	27.06
Sept-Îles P99.5 quotidien	4.60	3.31	3.79	27.34
Maniwaki P98 quotidien	5.32	4.37	3.71	21.10
Sept-Îles P98 quotidien	3.25	2.53	2.63	21.45

La moyenne maximale de la période est de $3.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à Sept-Îles et de $4.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à Maniwaki (+24.3%); sur l'ensemble des récepteurs Maniwaki a une moyenne de 83% plus élevée ($0.97 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vs $0.53 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et une médiane de 31.1% plus élevée ($0.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vs $0.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Les percentiles de moyennes de la période (Figure 13) montrent les valeurs plus élevés de Maniwaki. La corrélation de l'ensemble des moyennes de la période est de $r=0.38$ (significative); cette diminution est attribuable au régime éolien aux deux endroits qui montre des fréquences des directions passablement différentes.

Figure 11. Percentiles des concentrations horaires maximales

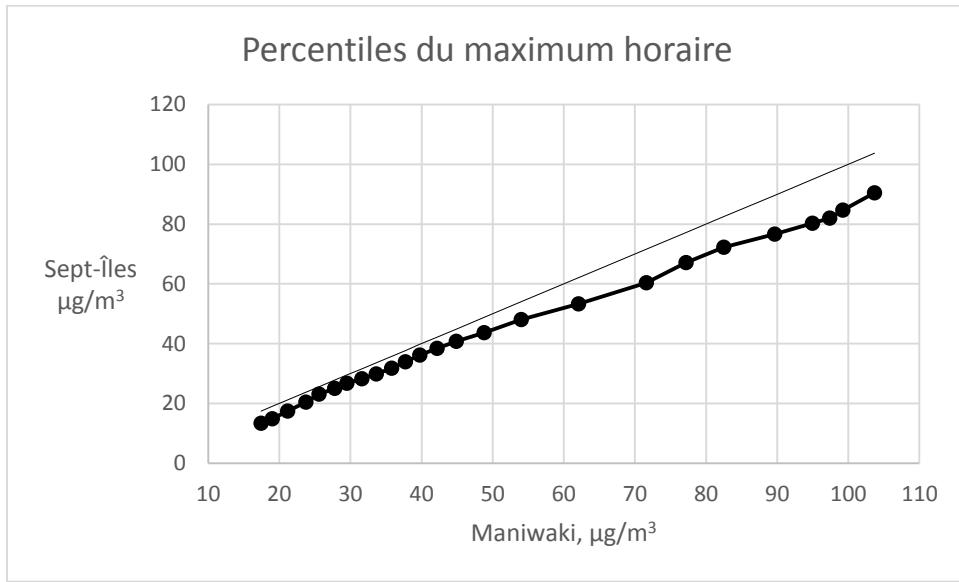


Figure 12. Percentiles des concentrations quotidiennes maximales

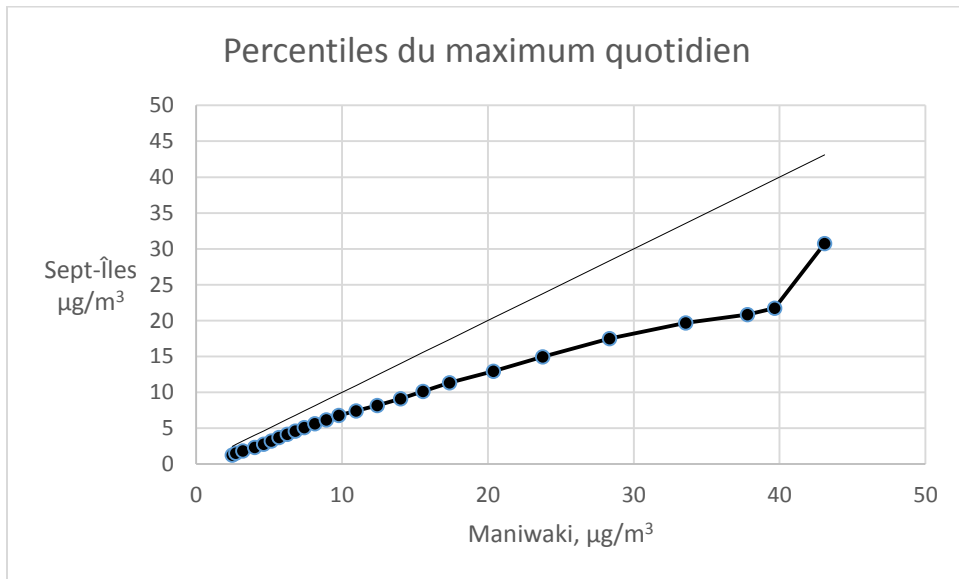
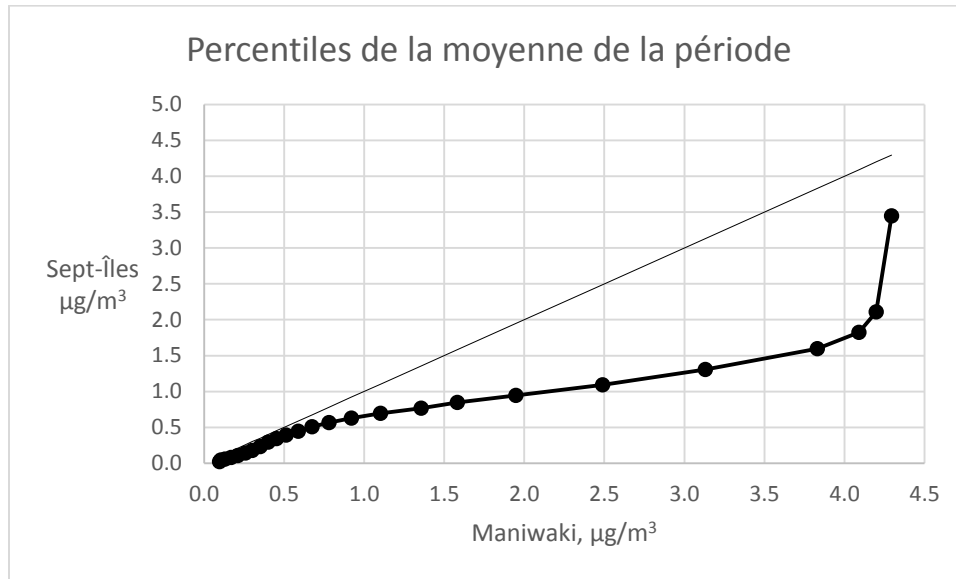


Figure 13. Percentiles des concentrations moyennes de la période



Sur l'ensemble des récepteurs, à Maniwaki, 50% des maxima horaires surviennent entre 20 h et 6 h, heures favorables aux conditions stables et 51% des concentrations maximales ont été calculées en juin, juillet et août; c'est durant ces mois que la fréquence des cas convectifs est la plus élevée. En saison froide (novembre à février), les maxima sont calculés entre 10 h et 16 h. Du mois d'avril au mois de septembre, il n'y a que peu de maxima entre 11 h et 17 h (5.9% du total); ceux-ci se produisent le matin et en fin de journée.

À Sept-Îles, 69.5% des concentrations maximales horaires sont calculées pour le mois de juin, juillet et août, mois avec des cas neutres fréquents. Durant la période plus froide, d'octobre à mars, les concentrations maximales sont surtout calculées pour les heures en fin d'après-midi entre 15 h et 17 h. Il n'y a pas de concentrations maximales calculées de mars à septembre entre 11 h et 16 h, sauf une à 12 h en septembre. Au total, 28% des maxima sont obtenus entre 20 h et 6 h.

Globalement, pour l'ensemble des récepteurs (Tableau 15) à Sept-Îles, la classe neutre est la plus souvent associée au maxima horaire, (environ 41%) alors qu'à Maniwaki c'est la classe stable (environ 47%).

Tableau 15. Fréquences (%) des cas de stabilité pour la concentration horaire maximale

Stabilité	Sept-Îles	Maniwaki
Instable	23.8	29.0
Neutre	40.5	24.2
Stable	35.7	46.8

On constate ainsi que les différences entre les deux stations montrent un rehaussement des concentrations à Maniwaki par rapport à Sept-Îles. On ne considère ici que l'ensemble des récepteurs, sans distinguer les différences spatiales (comme par exemple la position du maximum) associées aux fréquences différentes des directions de vent des deux endroits. De plus, dans les calculs de modélisation on doit aussi tenir compte de la topographie qui viendra à son tour influencer les résultats. Il est aussi nécessaire de considérer la limite de propriété de l'installation industrielle (les normes s'appliquent hors de la limite de propriété) et les récepteurs susceptibles d'être influencés par les émissions (par exemple, la localisation des premiers résidents) ou encore le type de normes qui s'appliquent (comme par exemple une valeur au percentile 98). Les conditions météorologiques locales influencent les variables micrométéorologiques qui à leur tour influencent les résultats des calculs de dispersion mais à ceci s'ajoutent ces dernières considérations locales. De plus, la source utilisée ici est une source ponctuelle; les résultats seront aussi différents pour d'autres types de sources comme par exemple des sources surfaciques.

5 CONCLUSION

Le modèle de dispersion AERMOD est largement utilisé dans les applications de modélisation de la dispersion atmosphérique. Les données météorologiques nécessaires au fonctionnement du modèle sont obtenues par le module AERMET qui, en utilisant des données météorologiques locales de surface et en altitude et les paramètres de surface locaux, calcule les variables micrométéorologiques de chaque heure.

On a comparé les variables micrométéorologiques de Maniwaki et Sept-Îles, stations situées dans deux régimes climatiques différents et séparées d'une distance d'environ 800 km.

Les résultats montrent les différences dans les caractéristiques reliées à la turbulence via la vitesse de frottement (u^*) et la vitesse convective (w^*), les conditions de stabilité et les hauteurs de mélange. À Maniwaki les fréquences des conditions stables sont davantage importantes alors qu'à Sept-Îles, les situations neutres prévalent. Les conditions de dispersion seront ainsi globalement très différentes entre les deux endroits. En effet, la modélisation pour une source ponctuelle en terrain plat montre pour l'ensemble de la période 2008 à 2012 et pour l'ensemble des récepteurs des concentrations plus élevées à Maniwaki qu'à Sept-Îles. Les conditions de dispersion affectent de manière différente les heures et les mois où les concentrations maximales horaires sont plus fréquemment observées.

De manière générale, en plus des différences induites par les variables météorologiques, on doit aussi considérer dans les calculs de dispersion et leur interprétation, la topographie, la localisation des récepteurs susceptibles d'être influencés (premiers résidents), la limite de propriété de l'installation ou encore le type de norme qui s'applique (ce qui n'a pas été fait ici). Les résultats obtenus ici concernent une source ponctuelle; ceux-ci seront différents pour d'autres types de source.

6 BIBLIOGRAPHIE

Barnéoud, P., 2016: La longueur d'Obukhov dans le modèle de dispersion atmosphérique lagrangien de courte distance (MLCD): importance et plage de validité. Rapport interne, Service de réponse aux urgences environnementales (SRUE), Centre météorologique canadien, 30 p.

EPA, 2008: AERSURFACE User's Guide. EPA-454/B-08-001, janvier 2008, révision 16 janvier 2013, 34 p.

EPA, 2019 a: AERMOD Model Formulation and Evaluation. EPA-454/R-19-014, August 2019, 177 p.

EPA, 2019 b: User's Guide for the AERMOD Meteorological Preprocessor (AERMET). EPA-454/B-19-028, August 2019, 310 p.

Panofsky, H.A., J.A. Dutton, 1984: Atmospheric Turbulence. Models and Methods for Engineering Applications. J. Wiley & Sons, 397 p.

Proulx, H., G. Jacques, A.-M. Lamothe, J. Litynski, 1987: Climatologie du Québec méridional. Ministère de l'Environnement du Québec, M.P. 65, 197 p. ISBN 2-550-18105-0.

7 REMERCIEMENTS

Nous remercions M. Philippe Barnéoud, *Environnement et changement climatique Canada*, pour ses judicieux conseils et commentaires. Nous remercions également *Lakes Environmental* pour l'usage de AERMOD-View.