

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ÉVALUATION DES MESURES DES PRÉCIPITATIONS SOLIDES FAITES AVEC UN  
DISDROMÈTRE LASER-OPTIQUE

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ(E)

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ATMOSPHÈRE

PAR

KAREL VEILLEUX

MARS 2023

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL  
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.04-2020). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier sincèrement ma directrice de recherche, Julie M. Thériault ainsi que Mathieu Lachapelle pour leur conseil, leur aide et leur support tout au long de ce projet. Je tiens également à remercier tous les étudiants de l'équipe de recherche de Julie M. Thériault pour la collecte des données d'observations et leur support qui ont permis la réalisation de ce projet.

J'aimerais également remercier mes collègues de bureaux, Julien Chartrand, Aurélie Desroches Lapointe et Mathieu Lachapelle avec qui il faisait toujours plaisir de partager tant en météorologie, que nos passions respectives. Finalement, je tiens à remercier ma famille et mes ami.e.s, Josée, Sylvain, Tristan, Lydia, Jonathan, Catherine, Isis et Sophie, qui m'ont écouté, soutenu et encouragé pendant la réalisation de mon projet.



## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	ii
LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.....	xi
RÉSUMÉ .....	xiii
INTRODUCTION.....	15
1.1 Mise en contexte .....	15
1.2 Objectifs et approche .....	24
CHAPITRE 2 APPROCHE ET MÉTHODOLOGIE .....	27
2.1 Station météorologique standard.....	27
2.2 Disdromètre laser-optique.....	27
2.3 Micro Rain Radar 2.....	28
2.4 Macrophotographies.....	29
2.5 Réanalyse .....	37
2.6 Événement météorologique étudié.....	37
2.7 Vitesse de chute utilisée.....	40
CHAPITRE 3 ANALYSE DES OBSERVATIONS MANUELLES .....	46
3.1 Évolution des types de cristaux issus des observations manuelles.....	46
CHAPITRE 4 ANALYSE DE LA VITESSE DE CHUTE ET DIMENSION DES PARTICULES DE PRÉCIPITATION MESURÉES AUTOMATIQUÉMENT .....	52
4.1 Analyse des caractéristiques dynamiques des types de cristaux .....	52
4.2 Spectre de vitesse en fonction du diamètre $v(D)$ .....	57
CHAPITRE 5 ANALYSE DU GIVRAGE SUR LA VITESSE DE CHUTE.....	62
5.1 Évolution et quantification du givrage durant l'événement .....	62
5.2 Corrélation entre le givrage et la vitesse de chute des particules .....	68
5.3 Analyse de l'influence du givrage sur la vitesse de chute.....	72
CHAPITRE 6 DISCUSSION ET CONCLUSION.....	81
6.1 Discussion .....	81

6.2 Conclusion..... 85

ANNEXE A FILTRE SUR LES PARTICULES DU DISDROMÈTRE LASER-OPTIQUE..... 88

ANNEXE B IMPACT DE LA VITESSE DU VENT SUR LES MESURES DU DISDROMÈTRE ..... 92

ANNEXE C ANALYSE DU GIVRAGE..... 94

RÉFÉRENCES..... 98

## LISTE DES FIGURES

- Figure 1. Schéma comportant tous les mécanismes de formations des précipitations. Figure tirée de Morrison et al. (2020).....16
- Figure 2. (a) Micro Rain Radar 2 (MRR-2), (b) disdromètre laser-optique, (c) montage caméra pour les macrophotographies. ....28
- Figure 3. Types de cristaux discriminés lors de l'analyse des macrophotographies : a) Plaque, b) aiguille, c) dendrite, d) colonne, e) grésil et f) neige roulée. ....32
- Figure 4. Six degrés de givrage suivant la méthodologie de Mosimann et al. (1994) résumé dans le Tableau 4 sont présentées : a) dendrite non-givrée (0), b) dendrite légèrement givrée (1), c) dendrite modérément givrée (2), d) dendrite densément givrée (3), e) dendrite fortement givrée (4) et f) une particule de neige roulée (5). Crédit macrophotographies : équipe de recherche à Julie M. Thériault. ....33
- Figure 5. Scores d'agrégation : a) Agrégation de 0 (cristal singulier), b) agrégation de 1 (2 à 10 cristaux), c) agrégation de 2 (10 à 50 cristaux) et d) agrégation de 3 (> 50 cristaux). ....34
- Figure 6. Protocole d'analyse des macrophotographies. Les types sont notés par leur lettre correspondante et encadrés en rouge, soit D pour dendrite, P pour plaque, G pour neige roulée et C pour colonne. Le degré de givrage suivant Mosimann et al. (1994) est indiqué dans l'encadré vert.....36
- Figure 7. Évolution temporelle de : a) Température (75 AMSL), b) humidité relative (%), c) taux de précipitation ( $\text{mm h}^{-1}$ ), d) Réflectivité radar du MRR2 (dBz), e) Vitesse Doppler du MRR2 ( $\text{m s}^{-1}$ ) et f) largeur spectrale du MRR2 entre le 1000 UTC 6 février et 0400 UTC 8 février 2020.....38
- Figure 8. Données de réanalyse ERA5. L'étoile rouge indique l'emplacement de Montréal. (a-c) la hauteur du géopotential (ligne pleine) et vents (kt) à 250 hPa. (d-f) Température (couleur), vent (kt) et la hauteur du géopotential (ligne pleine) à 850 hPa. (g-i) Pression de surface (ligne pleine) et épaisseur entre 1000-500 hPa (lignes pointillées). Réanalyse valide à 1000 UTC 6 février 2020 (a, d et g), à 1000 UTC 7 février 2020 (b, e et h) et 1000 UTC 8 février 2020 (c, f et i).....40
- Figure 9. Courbes théoriques définies dans le Tableau 6 pour : a) les dendrites, b) les aiguilles, c) les colonnes, d) les plaques, e) la neige roulée et f) le grésil. NG est pour non-givré, MR est pour modérément givré et DR est pour densément givré.....44
- Figure 10. Évolution temporelle des a) types de cristaux observés et des b) types de cristaux dominants. Les zones hachurées représentent un moment où aucune photo n'était disponible. L'axe y représente les types de cristaux de glace; IP est grésil, I est irrégulier, D est pour dendrite, P est pour plaque, C est pour colonne, N est pour aiguille et G est pour neige roulée. Chacun des types de cristaux est défini dans la Tableau 3. ....49
- Figure 11. Fraction d'occurrence des habites de croissances suite à l'analyse des 2167 macrophotographies entre 1000 UTC 2020-02-06 à 0400 UTC 2020-02-08. G représente la neige roulée, N les Aiguilles, C les colonnes, P les plaques, D les dendrites, I les irréguliers et IP le grésil.....50

Figure 12. En couleur est représenté le compte du nombre de particules normalisées par la largeur des bins pour les différentes gammes de : a) diamètres [mm] et b) de vitesses [ $m s^{-1}$ ]. Valide de 1000 UTC le 6 février 2020 à 0400 UTC le 8 février 2020. ....	53
Figure 13. Comptes normalisés enregistrés par le disdromètre laser-optique pour : a) le diamètre [mm] et b) la vitesse des particules. En pointillés sont représentées les moyennes. Valide de 1000 UTC le 6 février 2020 à 0400 UTC le 8 février 2020. ....	54
Figure 14. Comptes normalisés du disdromètre laser-optique pour : a) les diamètres et b) les vitesses sont représentées les types de cristaux, en bleu la neige roulée, en orange les aiguilles, en vert les colonnes, en rouge les plaques, en mauve les dendrites, en brun les irréguliers et en rose le grésil. ....	56
Figure 15. Spectre de vitesse en fonction du diamètre pour : a) les dendrites, b) les aiguilles, c) les colonnes, d) les plaques, e) la neige roulée et f) le grésil. Les courbes théoriques de vitesse en fonction du diamètre respectif sont représentées en bleu, orange et vert. La courbe noire pleine représente la médiane de chacune des distributions. Les courbes pointillées noires représentent les 5 <sup>e</sup> et 95 <sup>e</sup> percentiles et les courbes pointillées mauves les 25 <sup>e</sup> et 75 <sup>e</sup> percentiles. ....	60
Figure 16. Évolution du givrage en fonction du temps réalisée avec les observations manuelles. En noir le degré de givrage moyen suivant la méthode d'analyse de Mosimann et al. (1994) et en rouge un filtre gaussien de 6 <sup>e</sup> degré du givrage. Valide de 1000 UTC 2020-02-06 à 0400 UTC 2020-02-08. ....	62
Figure 17. Évolution du givrage pour chacun des types cristaux réalisée à l'aide des observations manuelles pour : a) la neige roulée, b) les aiguilles, c) les colonnes, d) les plaques, e) les dendrites, f) les irréguliers et g) le grésil. Valide de 1000 UTC le 6 février 2020 à 0400 UTC le 8 février 2020. ....	64
Figure 18. Fraction d'occurrence des types de cristaux de glace réalisés avec les observations manuelles pour trois régimes de givrage : a) régime 1 est un taux de givrage léger, b) régime 2 est un taux de givrage modéré et c) régime 3 est densément givré. ....	66
Figure 19. Exemple des types de cristaux associées aux fractions d'occurrences des 3 régimes de givrage : a) Colonne du régime 1, b) colonne du régime 2, c) aiguille du régime 1, d) aiguille du régime 2, e) grésil du régime 1, f) grésil du régime 2, g) irrégulier du régime 1, h) irrégulier du régime 3, i) plaque du régime 1, j) dendrite du régime 1, k) dendrite du régime 2 et l) dendrite du régime 3. ....	67
Figure 20. Évolution temporelle de 1500 UTC 2020-02-06 à 0700 UTC 2020-02-07 : a) des types de cristaux, b) de la vitesse terminale moyenne mesurée par le disdromètre laser-optique (ligne pleine) ainsi qu'un filtre Gaussien (ligne pointillé) et c) le degré de givrage. La région hachurée en b) représente un manque de données. ....	71
Figure 21. Spectre de vitesse en fonction du diamètre pour les colonnes en trois régimes de givrage : a) de pas givré (0) à légèrement givré (1), b) de légèrement givré (1) à densément givré (3) et c) de densément givré (3) à neige roulée (5). Les courbes pleines colorées représentent les courbes théoriques de vitesse en fonction du diamètre des colonnes longues (bleu) tirée de Rasmussen et al. (1999), les colonnes courtes (orange) tirée de Rasmussen et al. (1999) et tous les types de colonnes (vert) tirées de Vásquez-Martín & al (2021). La courbe noire pleine représente la médiane de chacune des distributions. Les courbes pointillées noires représentent les 5 <sup>e</sup> et 95 <sup>e</sup> percentiles et les courbes pointillées mauves les 25 <sup>e</sup> et 75 <sup>e</sup> percentiles. ....	73



Figure 22. Spectre de vitesse en fonction du diamètre pour les aiguilles en trois régimes de givrage : a) de pas givré (0) à légèrement givré (1), b) de légèrement givré (1) à densément givré (3) et c) de densément givré (3) à neige roulée (5). La courbe orange pleine représente la courbe théorique des aiguilles tirée de Barthazy et Schefold (2006), la courbe bleue est tirée de Rasmussen et al. (1999) et la courbe verte pleine est tirée de Vásquez-Martín & al (2021). La courbe noire pleine représente la médiane de chacune des distributions. Les courbes pointillées noires représentent les 5<sup>e</sup> et 95<sup>e</sup> percentiles et les courbes pointillées mauves les 25<sup>e</sup> et 75<sup>e</sup> percentiles. ....75

Figure 23. Spectre de vitesse en fonction du diamètre pour les dendrites en trois régimes de givrage : a) de pas givré (0) à légèrement givré (1), b) de légèrement givré (1) à densément givré (3) et c) de densément givré (3) à neige roulée (5). La courbe orange pleine représente la courbe théorique des aiguilles tirée de Barthazy et Schefold (2006), la courbe verte est tirée de Rasmussen et al. (1999) et la courbe rouge pleine est tirée de Vásquez-Martín & al (2021). La courbe noire pleine représente la médiane de chacune des distributions. Les courbes pointillées noires représentent les 5<sup>e</sup> et 95<sup>e</sup> percentiles et les courbes pointillées mauves les 25<sup>e</sup> et 75<sup>e</sup> percentiles. ....77

Figure 24. Spectres de vitesses en fonction du diamètre pour deux régimes de givrage : a) régime 1 incorporant les particules du stage 0 au stage 2 de givrage et b) le régime 2 de givrage incorporant les particules du stage 3 au stage 5. Les courbes de la neige sèche (ligne pleine orange) et de la neige mouillée (ligne pleine verte) sont représentées en a) et en b), respectivement tirées de Rasmussen et al. (1999). La courbe noire pleine représente la médiane de chacune des distributions. Les courbes pointillées noires représentent les 5<sup>e</sup> et 95<sup>e</sup> percentiles et les courbes pointillées mauves les 25<sup>e</sup> et 75<sup>e</sup> percentiles. ....79

Figure 25. En couleur est représenté l'évolution temporelle du compte des particules normalisé avec un filtre à 2 particules pour les différentes gammes de : a) diamètres [mm] et b) de vitesses [ $m s^{-1}$ ]. ..89

Figure 26. En couleur est représenté l'évolution temporelle du compte des particules normalisé avec un filtre à 5 particules pour les différentes gammes de : a) diamètres [mm] et b) de vitesses [ $m s^{-1}$ ]. ..90

Figure 27. En couleur est représenté l'évolution temporelle du compte des particules normalisé avec un filtre à 10 particules pour les différentes gammes de : a) diamètres [mm] et b) de vitesses [ $m s^{-1}$ ]. ....91

Figure 28. Évolution temporelle de : a) vitesse du vent à la surface (2 m + 75 m AMSL), b) vitesse terminale moyenne des particules mesurées par le disdromètre laser-optique (ligne rouge), vitesse de chute mesurée par le Micro Rain Rada (MRR) à 600 m (ligne bleue) et à 800 m (ligne orange) et c) la différence sur la mesure de la vitesse de chute entre le disdromètre laser-optique.....93

Figure 29. Spectres de vitesses en fonction du diamètre pour deux régimes de givrage en retirant la présence des plaques et dendrites ayant des vitesses de chute élevées : a) la neige sèche contient les particules non givrées et au stage 2 et b) la neige mouillée/givrée contient les stages de givrage de 3 à 5. Les courbes de la neige sèche (ligne pleine orange) et de la neige mouillée (ligne pleine verte) sont représentées en a) et en b), respectivement tirées de Rasmussen et al. (1999). La courbe noire pleine représente la médiane de chacune des distributions. Les courbes pointillées noires représentent les 5<sup>e</sup> et 95<sup>e</sup> percentiles et les courbes pointillées mauves les 25<sup>e</sup> et 75<sup>e</sup> percentiles. 94

Figure 30. Spectres de vitesses en fonction du diamètre pour deux régimes de givrage : a) la neige sèche contient les particules non givrées et au stage 1 et b) la neige mouillée/givrée contient les stages de

givrage de 2 à 5. Les courbes de la neige sèche (ligne pleine orange) et de la neige mouillée (ligne pleine verte) sont représentées en a) et en b), respectivement tirées de Rasmussen et al. (1999). La courbe noire pleine représente la médiane de chacune des distributions. Les courbes pointillées noires représentent les 5<sup>e</sup> et 95<sup>e</sup> percentiles et les courbes pointillées mauves les 25<sup>e</sup> et 75<sup>e</sup> percentiles. ....95

Figure 31. Spectres de vitesses en fonction du diamètre pour deux régimes de givrage en retirant la présence des plaques et dendrites ayant des vitesses de chute élevées : a) la neige sèche contient les particules non givrées et au stage 1 et b) la neige mouillée/givrée contient les stages de givrage de 2 à 5. Les courbes de la neige sèche (ligne pleine orange) et de la neige mouillée (ligne pleine verte) sont représentées en a) et en b), respectivement tirées de Rasmussen et al. (1999). La courbe noire pleine représente la médiane de chacune des distributions. Les courbes pointillées noires représentent les 5<sup>e</sup> et 95<sup>e</sup> percentiles et les courbes pointillées mauves les 25<sup>e</sup> et 75<sup>e</sup> percentiles. 96

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Modes de nucléations hétérogènes adaptés de Vali, G. et al. (2015). .....	17
Tableau 2. Description des étapes d'analyse des macrophotographies. ....	30
Tableau 3. Définition des types de cristaux de glace analysées lors de cette étude.....	31
Tableau 4. Degrés de givrage adapté de Mosimann et al. (1994). ....	32
Tableau 5. Vitesse terminale en fonction du diamètre adapté de Rasmussen et al. (1999). $v$ est en $m s^{-1}$ et $D$ en mm. ....	43
Tableau 6. Évolutions de l'occurrence des types de cristaux de glace scindée en 7 périodes durant l'événement de précipitation valide de 1000 UTC 2020-02-06 à 0400 UTC 2020-02-08. ....	50
Tableau 7. Diamètres et vitesses moyennes des différentes types de cristaux. ....	57
Tableau 8. Corrélation entre le givrage et les vitesses terminales moyennes mesurées par le disdromètre laser-optique pour les 7 périodes de l'événement illustré à la Figure 10. ....	69

## LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

MRR2	Micro Rain Radar 2
ERA5	ECMWF ReAnalysis version 5
AMSL	Au-dessus du niveau moyen de la mer
MASC	<i>Multi-Angle Snowflake Camera</i>
2-DVD	<i>Two-Dimensional Video Disdrometer</i>
HVSD	<i>Hydrometeor velocity and shape detector</i>
D-ICI	<i>Dual ice crystal imager</i>



## RÉSUMÉ

Les précipitations solides se retrouvent sous différentes formes, leur répartition spatiale dans l'atmosphère varient ainsi que leurs propriétés physiques. La tempête hivernale du 6 au 8 février 2020 a engendré près de 35 cm de neige sur certaines portions de la région métropolitaine totalisant 42 heures de précipitations consécutives. Cette recherche vise à évaluer les vitesses de chute existantes de plusieurs types de cristaux de glace caractérisés par plusieurs degrés de givrage. Pour ce faire, les mesures automatiques obtenues à partir du disdromètre laser-optique ont été confrontées aux observations manuelles et macrophotographies. Suite à l'analyse des 2169 macrophotographies de cristaux de glaces suivant le protocole développé, on note l'occurrence de dendrites, d'aiguilles, de colonnes, de plaques, de grésil, de neige roulée et de particules irrégulières. Sept périodes de cristaux ont pu être distinguées. Il a été montré que les vitesses de chutes de certaines des sept périodes de cristaux étaient plus sensibles au givrage, notamment lors de la présence de colonnes et d'aiguilles givrées. Néanmoins, les spectres de vitesses en fonction du diamètre ont montré qu'il existe une sensibilité des particules au givrage pour une gamme de diamètres entre 1 et 4 mm et ce, pour les colonnes, les aiguilles et les dendrites. Il est par contre difficile de détecter la vitesse de chute des différents types de cristaux de glace individuels à l'aide des équations vitesse-diamètre existantes. Lorsque les précipitations solides sont classées en deux catégories, neige sèche et neige mouillée ou givrée, on obtient que la vitesse de chute de la neige sèche est sous-estimée et que la neige mouillée ou givrée est bien représentée. Les différences peuvent s'expliquer par la vitesse du vent horizontal et des limitations intrinsèques du disdromètre laser-optique. Celles-ci peuvent entraîner une surestimation des vitesses de chute pour les particules plus petites que 1 mm. L'application du protocole d'analyse sur plusieurs événements ayant des vents de surface moins élevés pourrait contribuer à l'amélioration de notre compréhension de l'influence du givrage sur la vitesse de chute des hydrométéores.

Mots-clés : microphysique des nuages, précipitations hivernales, givrage, disdromètre laser-optique, observations manuelles, vitesse de chute, macrophotographies.



## INTRODUCTION

### 1.1 Mise en contexte

Le Canada est fortement impacté par les tempêtes hivernales qui amènent annuellement jusqu'à plusieurs mètres de neige sur certains endroits (Stewart et al. 1992,1995; Milton et Bourque 1998). Les différents climats du Canada tels que les régions côtières, les Rocheuses canadiennes, les Prairies et l'est du Canada reçoivent différentes quantités de précipitation sous différentes formes et phases (Stewart et King 1987 ; Rauber et al. 2000 ; Cortinas et al. 2004). La détermination du type précis de précipitation lors des événements de précipitations hivernales est primordiale dans la prévention et l'anticipation du temps qu'il fera. De légères fluctuations de température peuvent avoir un impact majeur sur la sévérité des tempêtes si celle-ci oscille autour de 0°C (Thériault et al. 2012; Pomeroy et al. 2016; Stewart et al. 2019). En revanche, lorsque les températures sont < 0°C, plusieurs types de cristaux de glace peuvent se former en altitude et atteindre la surface.

Les nuages menant aux précipitations peuvent être sous forme liquide, solide ou en phase mixte. Ces particules de nuages, sous forme de gouttelettes d'eau liquide ou de cristaux de glace, vont croître grâce à plusieurs processus microphysiques. Ces processus microphysiques sont résumés à la Figure 1 (Morrison et al. 2020).

La nucléation est la première étape de la formation des nuages, qui peut éventuellement mener à des précipitations. Cette nucléation peut se faire de façon homogène ou hétérogène. Le parcours homogène est la transition de vapeur d'eau pure atmosphérique directement sous forme de gouttelette d'eau liquide. Ce phénomène est rare, voire inexistant dans l'atmosphère car il se produit à une humidité relative d'environ quelques centaines de pourcentages (Wilson 1900). D'autres études ont montré que l'humidité relative à même un cumulus moyen dépasse très rarement 102 % (Warner 1968; Politovich et Cooper 1988). La nucléation hétérogène est donc le mécanisme principal dans l'atmosphère réelle où le passage de la phase gazeuse vers la phase liquide est facilité par des particules d'aérosols naturelles ou anthropiques (Andreae et Rosenfeld 2008). Les aérosols ont pour effets de réduire la barrière énergétique libre de Gibbs de formation de surface et facilitent ainsi la condensation (Lamb et Verlinde 2008).



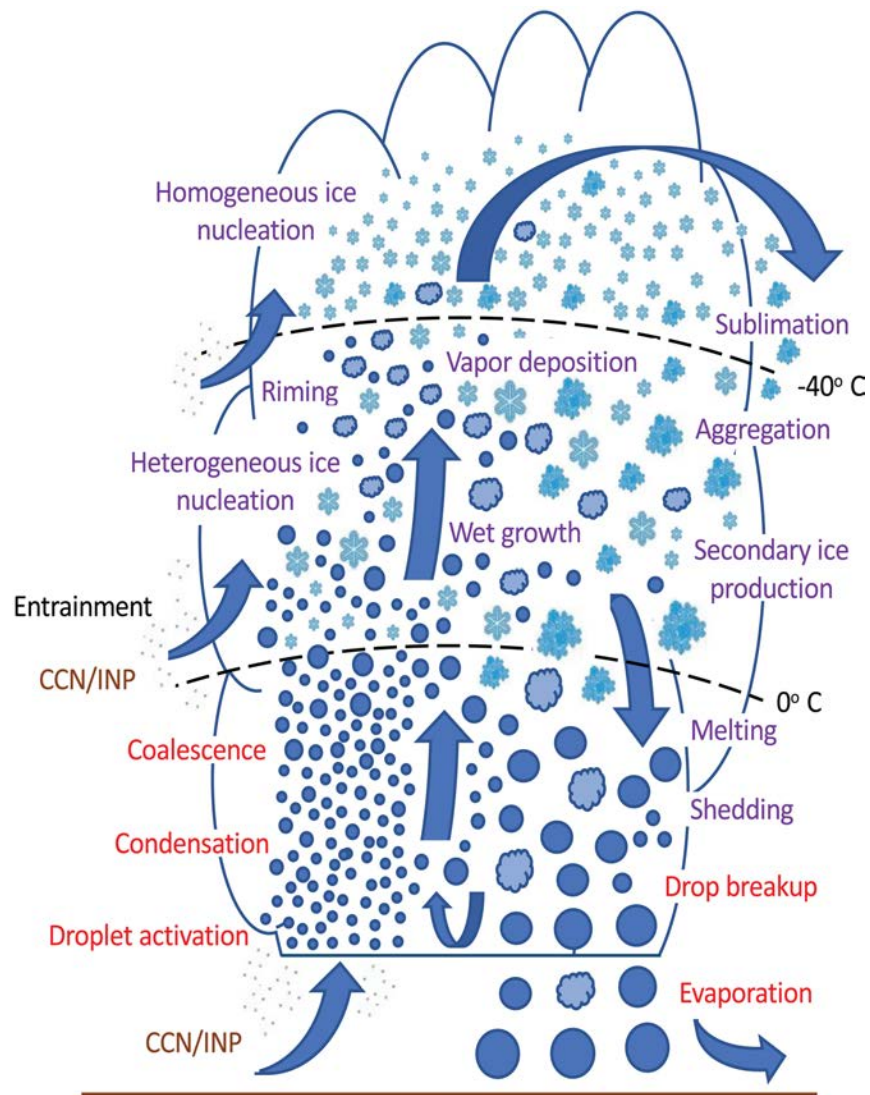


Figure 1. Schéma comportant tous les mécanismes de formations des précipitations. Figure tirée de Morrison et al. (2020).

Pour les cristaux de glaces, il existe deux modes connus de nucléation hétérogène : 1) la nucléation par déposition; 2) la nucléation par gel qui englobe le gel par contact, le gel par condensation et le gel par immersion qui sont résumés dans la Tableau 1 (Vali et al. 2015). La nature des noyaux de glaciation joue un rôle sur l'occurrence de certains types de nucléation et de leur efficacité (Murray et al. 2012).

Tableau 1. Modes de nucléations hétérogènes adaptés de Vali, G. et al. (2015).

Mode	Description
Nucléation par déposition	Nucléation de la glace issue de vapeur sursaturée sur un noyau de glaciation ou équivalent sans passé par la phase liquide.
Nucléation par gel	Gel par immersion : se réfère à la nucléation de la glace initiée par un noyau glaciation ou équivalent localisé dans le corps liquide.
	Gel par contact : est initié par un noyau de glaciation ou équivalent à l'interface air-eau lorsque le noyau de glaciation entre en contact avec le liquide
	Gel par condensation : survient à la suite du passage de la formation de la phase liquide sur un noyau de condensation à des températures inférieures à 0°C.

L'occurrence des processus microphysiques chauds se font à des températures plus grandes que 0°C. Les nuages chauds ne contiennent que des hydrométéores sous forme liquide et ont été étudiés originellement par Langmuir (1948). Il existe deux parcours de croissances pour une gouttelette formée, soit par déposition de la phase vapeur et/ou par la collection d'autres particules (Lamb et Verlinde 2008). La croissance par déposition de vapeur survient lorsque la différence en la pression partielle de vapeur de l'environnement excède celle de la pression de vapeur à l'équilibre à la surface de la gouttelette (Lamb et Verlinde 2008). Les gouttelettes vont croître jusqu'à atteindre un diamètre de 10-20  $\mu\text{m}$ . À partir de ces tailles, la diffusion de vapeur d'eau devient difficile dû à la diminution de la quantité de vapeur d'eau disponible dans l'atmosphère. Pour des diamètres supérieurs à 10-20  $\mu\text{m}$ , la croissance est dominée par le mécanisme de collision-coalescence

(Pruppacher et Klett 1997). Les collisions se font de façons stochastiques, néanmoins l'efficacité des collisions est dictée par le rapport entre la taille de la goutte collectrice et de la gouttelette collectée. Klett (1971) a montré que les gouttes d'eau peuvent atteindre un diamètre maximal de 10 mm au-delà duquel les gouttes deviennent instables et tendent à rompre à travers divers modes d'éclatement. Néanmoins, les gouttes d'eau dépassent très rarement 6 mm en diamètre (Magarvey et Geldart 1962). Les gouttes d'eau atteignant ce seuil ont tendance à se rompre aérodynamiquement lorsque la force de flottabilité excède les forces de tensions de surfaces ou en entrant en collision avec d'autres gouttelettes (Lamb et Verlinde 2008).

Les nuages plus froids vont produire des cristaux de glace. Les processus froids sont plus complexes que les processus chauds. La coexistence et l'interaction de la phase liquide et de la phase solide dans les nuages froids a pour effet de rendre l'étude de ces phénomènes difficiles (Morrison et al. 2020). En effet, l'état surfondu de l'eau a été observé jusqu'à des températures de  $-35^{\circ}\text{C}$  en Allemagne (Weickmann 1949) et de  $-40.7^{\circ}\text{C}$  au-dessus des Rocheuses canadiennes (Heymsfield et Sabin 1989). Par conséquent, les nuages de phases mixtes surviennent généralement dans des gammes de températures d'environ  $-35^{\circ}\text{C}$  à  $0^{\circ}\text{C}$  (Pruppacher et Klett 1997). En dessous de  $-40^{\circ}\text{C}$ , les gouttelettes gèlent spontanément. La formation de la glace requiert un support afin d'être nucléée, c'est-à-dire la présence d'un noyau de glaciation actif. La concentration de noyau de glaciation est dépendante de la température de l'environnement et est approximativement de  $1\text{L}^{-1}$  à  $-20^{\circ}\text{C}$ . Cette concentration de noyaux de glaciation augmente par un facteur de 10 à chaque diminution de  $4^{\circ}\text{C}$  à partir d'environ  $-20^{\circ}\text{C}$  (Fletcher 1962).

Il existe deux grandes catégories de glace dans l'atmosphère. La première étant la glace primaire qui origine par de la vapeur sursaturée ou de gouttelettes surfondues qui gèlent par contact. La deuxième est la glace secondaire qui se forme seulement lorsqu'il y a déjà présence de glace a priori dans le nuage à travers différents mécanismes (Lamb et Verlinde 2008). Il a été montré que la concentration de particules de glace dépasse de quelques magnitudes la concentration de noyaux de glaciation disponibles (Mossop 1985; Hobbs et Rangno 1985; Beard 1992; Pruppacher et Klett 1997). Quelques mécanismes ont été proposés pour expliquer cette différence en magnitudes des concentrations : 1) Gel par contact d'une goutte d'eau surfondu avec une autre particule solide ou liquide (Beard 1992; Young 1974; Hobbs et Rangno 1985) ; 2) Particules de glace prénucléées

(Beard 1992; Fridlind et al. 2007) ; 3) Production de glace secondaire (Hallet et Mossop 1974; Brewer et Palmer 1949).

Les particules de glace peuvent croître en fonction de l'eau surfondue dans les nuages mixtes par diffusion de vapeur (Wegener 1911; Bergeron 1935; Findeisen 1938). C'est le processus de Wegener-Bergeron-Findeisen. À des températures sous 0°C, la phase solide de la glace est énergétiquement plus stable que la phase liquide qui est dans un état métastable. Lorsque la pression de vapeur de l'environnement se trouve entre la pression de vapeur saturante à l'équilibre de la phase solide et liquide, la diffusion de l'eau liquide des gouttelettes surfondues est possible (Rogers et Yau 1989). La coexistence de la phase liquide et solide peut être observée sur une extension verticale de quelques centaines de mètres seulement et varie selon la saison (de Boer et al. 2009). La présence d'une couche de gouttelette d'eau surfondue est essentielle au processus de croissance par accréation ou givrage. En effet, les cristaux en chute libre vont collecter les gouttelettes d'eau surfondues en suspension et croître par accréation (Lamb et Verlinde 2008). Les gouttelettes d'eau surfondues sont en général entre 10 et 100  $\mu\text{m}$  et l'accréation se fait la plupart du temps sur une seule des faces du cristal (Rango et al. 2003). L'accréation de glace ou givrage augmente la masse de la particule sans augmenter drastiquement la taille de la surface (Lamb et Verlinde 2008). Elle a donc pour effet d'augmenter la vitesse de chute des particules (Ono 1969; Locatelli et Hobbs 1974; Heymsfield et Kajikawa 1987; Barthazy et Schefold 2006). Il a été montré que le givrage serait possiblement responsable de 40% à 100% de l'accumulation de masse par les particules de glace durant leur chute (Hariyama et Sato 1989; Mitchell et al. 1990; Moisseev et al. 2017).

La taille des flocons de neige peut varier. L'agrégation est le processus où les collisions glace-glace permettent la collection de flocons les uns avec les autres et donc leur croissance. L'analyse de 280 événements de précipitations a montré que l'agrégation diminue avec la diminution de la température et devient pratiquement nulle à des températures inférieures à -10°C (Dobrowolski 1903). Similairement, Magono (1953, 1960) a mesuré des maxima de dimensions pour des températures près de -1°C. Hobbs et al. (1974) ont observés un second maximum de tailles des particules associées à des caractéristiques dendritiques à des fortes sursaturations par rapport à la glace. Ce second maximum se produit à des températures près de -12°C et -17°C, où l'effet

Wegener-Bergeron-Findeisen est optimal. Gunn et Marshall (1958) ont proposé une loi adaptée de Marshall et Palmer (1948) décrivant la distribution de taille des flocons de neige.

Les cristaux de glace vont croître sous différentes formes en fonction de la température de l'air et de l'humidité (Nakaya 1954; Magono et Lee 1966; Kikuchi et al. 2013). Néanmoins, la forme cristallographique solide de base de la molécule d'eau est un prisme à six plis hexagonaux. Les directions de croissances relatives dépendent de la température et de la sursaturation (Nakaya 1954; Mason et Shaw 1955; Kobayashi et al. 1957; Kobayashi 1958; Hallett et Mason 1958). Ces études ont démontré qu'un changement cyclique de préférence de croissance cristallographique de plaque-colonne-plaque-colonne à des températures d'environ  $-4^{\circ}\text{C}$ ,  $-9^{\circ}\text{C}$  et  $-22^{\circ}\text{C}$  respectivement. Les deux premières limites transitionnelles ( $-4^{\circ}\text{C}$  et  $-9^{\circ}\text{C}$ ) sont mieux définies que la dernière ( $-22^{\circ}\text{C}$ ) où la gamme de températures de changements cristallographiques est plus diffuse à travers les diverses études. Même si la température est le principal facteur qui influence le type de cristal de glace, la sursaturation joue un rôle important dans l'étalement horizontal et vertical des particules de glace. Pour une gamme de température autour de  $-15^{\circ}\text{C}$  la forme du cristal de glace va évoluer avec l'augmentation de la sursaturation, par exemple, de plaque épaisse à une dendrite, en passant par une plaque sectorielle (Kobayashi 1961). Cette gamme de température est associée au maximum de la différence entre la pression de vapeur saturante par rapport à l'eau liquide et la pression de vapeur saturante par rapport à la glace.

Les différents types cristal de glace individuels ont pour la plupart une densité apparente plus faible que celle de la glace pure. Entre autres dû à la façon dont croissent les cristaux, tels que les dendrites, ayant une grande extension horizontale ou des cristaux ayant des cavités comme les colonnes creuses (Pruppacher et Klett 1997). Plusieurs études ont analysé la densité des types de cristaux de glace (Heymsfield 1972; Iwai 1973; Heymsfield et Kajikawa 1987; Zikmunda et Vali 1972; Mitchell et al. 1990). La plupart des cristaux de glace individuels ont des densités supérieures à  $0.5 \text{ g cm}^{-3}$  en comparaison avec  $0.9 \text{ g cm}^{-3}$  pour la glace pure (Rasmussen et al. 1999). Cette densité diminue avec l'agrégation (Brandes et al. 2007) et l'augmentation de la température.

Les différents types de cristaux de glace tombent à différentes vitesses de chute due à leur taille, leur forme et leur densité. L'existence d'une multitude de types de cristaux de glace dans l'atmosphère rend complexe l'assignation d'une relation empirique d'écrivant la vitesse de chute

en fonction de leur taille. Il a été montré que l'utilisation du nombre de Davies en fonction du nombre de Reynolds permettait de retrouver des lois de puissances de vitesse en fonction du diamètre (Knight et Heymsfield 1983; Heymsfield et Kajikawa 1987). Le nombre de Davies est dépendant du coefficient de traînée qui est propre à chacune des géométries des hydrométéores non-sphérique et qui est ardu de calculer (Mitchell 1996). Une simplification est faite en considérant que la couche limite engendrée par la particule est attachée à celle-ci permettant de négliger la friction et considérer l'écoulement comme potentiel (Abraham 1970). La vitesse de chute trouvée est équivalente à la vitesse terminale à la surface. La vitesse terminale est décrite par :

$$v = \alpha D^\beta \quad (1)$$

Où  $v$  est en  $\text{m s}^{-1}$ ,  $\alpha$  et  $\beta$  sont des constantes propres à chacun des types de cristaux et  $D$  représente le diamètre maximal.

Il est commun d'essayer de classer les précipitations solides en catégories plus générales. Celles-ci sont, par exemple, la neige sèche, la neige mouillée, les agrégats non-givrés, les agrégats givrés, celle de la neige roulée et la courbe théorique de la pluie (Holroyd 1971; Rogers 1973; Locatelli et Hobbs 1974; Rasmussen et al. 1999; Brandes et al. 2008; Ishizaka et al. 2013). Par exemple, Brandes et al. (2007) ont montré l'influence de la température sur la vitesse de chute des particules causées par l'agrégation des flocons de neige. En effet, l'augmentation de la température a pour effet de faciliter l'adhésion entre les particules et ainsi la croissance de celles-ci par agrégation.

Comme les vitesses de chute des types de précipitations solides dépendent de plusieurs paramètres, il est commun de les simplifier en les représentant sous forme de vitesse de chute en fonction du diamètre des particules de précipitations (Équation 1). Ces paramètres, tels que la masse, le diamètre et la forme, sont requis dans la formulation de ces lois de puissances et sont retrouvés à l'aide de divers instruments. Notamment, le Multi-Angle Snowflake Camera (MASC) qui est un imageur composé de trois caméras positionnées à plusieurs angles qui prends des photos d'hydrométéores individuels et qui mesure la vitesse de chute de celles-ci (Garrett et al. 2012). Cet instrument est plus récent et plusieurs études sur les caractéristiques microphysiques ont été faites (Notaroš et al. 2016; Praz et al. 2017). Le *two-dimensional video disdrometer* (2-DVD) mesure la

distribution de taille des particules de précipitations (DSD) par deux sources laser orthogonales qui permettent également de retrouver des informations tridimensionnelles de la forme des particules de précipitations (Kruger et Krajewski 2002). Le 2-DVD a notamment été utilisé par Brandes et al. (2007) pour retrouver les distributions de tailles de la neige et pour la pluie (Cao et al. 2008). Un disdromètre laser-optique (OTT Parsivel<sup>2</sup>) est un instrument muni d'une source laser qui mesure la taille et la vitesse de chute des particules. Battaglia et al. (2010) ont comparé les mesures conjointement du OTT Parsivel<sup>2</sup> et du 2-DVD et ont soulevé que le OTT parsivel<sup>2</sup> tend à surestimer les particules de petites et de grandes tailles.

Plusieurs études ont mené à des fonctions empiriques décrivant la vitesse de chute en fonction du diamètre pour différents types de cristaux de glace (Nakaya et Terada 1935; Zikmunda et Vali 1972; Locatelli et Hobbs 1974, Heymsfield et Kajiwaka 1987, Kuhn et Vázquez-Martín 2020). Les fonctions théoriques de vitesse en fonction du diamètre pour les cristaux naturels sont retrouvées à travers diverses méthodes, en voici quelques exemples :

- Nakaya et Terada (1935) ont utilisés un montage vertical à cinq compartiments verticaux. Les particules en chutent libres sont collectées par une première boîte en bois et passent de façon individuelle dans une fente de 1 cm de diamètre. À la suite du passage de la particule dans l'ouverture, un clapet est fermé pour éviter toute influence de l'environnement sur le mouvement vertical. La particule passe ensuite dans une autre boîte munie d'un éclairage incandescent et de fenêtres d'observations où un observateur chronomètre manuellement le passage de la particule. Le chronomètre enregistre le temps de passage entre la boîte fenêtrée et la boîte inférieure séparées d'une distance de 2 mètres. Ainsi la vitesse de chute de la particule est déterminée. La masse de la particule est déterminée à l'aide du diamètre de la goutte qu'a formé le cristal fondu sur la plaquette collectrice placée à la fin du parcours verticale.
- Locatelli et Hobbs (1974) ont utilisé une paire de lampes incandescentes reliées avec une fibre optique qui transmettait le signal et une autre qui recevait le signal. Le délai d'intensité était par la suite mesuré par un photomultiplicateur et les vitesses de chute en étaient ainsi déduites par méthode d'occultation. Les particules individuelles étaient ensuite collectées

sur une plaquette en plastique et le type de cristal était identifiée au stéréo microscope. La masse était estimée en faisant fondre la particule sur la plaque et en déduisant la masse à l'aide du diamètre de la goutte et de la densité de l'eau liquide. Des lois de puissances pouvaient alors être retrouvées par conversion logarithmique utilisant la courbe ayant le meilleur ajustement.

- Barthazy et Schefold (2006) ont utilisés un *Hydrometeor velocity and shape detector* (HVSD) qui mesure les propriétés de tailles et de vitesses pour chacun des flocons tombant dans l'ouverture de 77 cm<sup>2</sup>. Cet instrument est basé sur le modèle du *shadowgraph* et est muni de deux faisceaux horizontaux parallèles de lumières incandescentes et uniformes séparés d'une distance de 10 mm. Deux images sont produites pour chaque hydrométéore tombant dans l'aire de mesure et les propriétés microphysique telles que le diamètre et la vitesse de chute sont retrouvées par occultation. Plus de 40 000 particules de précipitation ont été analysées et de nouvelles courbes théoriques pour les dendrites, les plaques, les aiguilles, la neige roulée sont proposées pour différents degrés de givrages.
- Kuhn et Vázquez-Martín (2020) ont quant à eux employés un D-ICI (*Dual Ice Crystal Imager*). Les particules naturellement en chutent libres sont imagées à haute résolution optique (3.7 μm) selon deux angles, l'un de profil et l'autre du dessus. La vitesse de chute est déduite à l'aide de deux expositions des photos de profils avec des points de références prenant en compte la forme des particules. Les particules étaient alors classées en 15 groupes définis dans Kuhn et Vázquez-Martín (2020). Un total de 10 000 particules enregistrées de l'hiver 2014-2015 à 2018-2019, mais seules les particules tombant entièrement dans le plan de vue de l'imageur du dessus et qui ne vacillaient pas ont été considérées (2461 particules).

La collecte de données microphysiques à travers ces méthodes entraine nécessairement des incertitudes quant à l'identification et la quantification des précipitations. Ces incertitudes peuvent être liées à des choix semi-arbitraires et qualitatifs, tel que l'attribution d'un degré de givrage des particules de glace (Barthazy et Schefold 2006) ou voir le calcul du temps de chute des particules à l'aide d'un chronomètre (Nakaya 1935). Les incertitudes peuvent également être liées à des



limitations intrinsèques des instruments. Par exemple, le OTT Parsivel<sup>2</sup> qui considère les particules tombant dans le détecteur comme des sphéroïdes Battaglia et al. (2010). Ainsi, les différences entre les instruments quant à la mesure de la dimension et la vitesse de chute des particules influencent grandement la forme que prendront les courbes théoriques de vitesse en fonction du diamètre. En effet, car les courbes théoriques de vitesse-diamètre sont hautement sensibles et dépendantes de la base de données récoltée. À ce jour, Locatelli et Hobbs (1974) restent l'une des plus grandes campagnes de mesures et sont souvent comparés en référence dans la littérature.

Peu d'études ont utilisé plusieurs catégories quantitatives claires de givrage pour décrire les particules solides de précipitation. L'utilisation de termes généraux dans la classification du givrage est souvent faite, telle que « légèrement givré » ou « densément givré » ou seulement « givré » (Locatelli et Hobbs 1974; Heymsfield et Kajikawa 1987; Rasmussen 1999). La quantification ou l'échelle du givrage dans ces études est souvent mal explicitée.

Des instruments sophistiqués donnant des informations tridimensionnelles sur les particules (MASC, 2-DVD) permettent de faire la validation et la classification des particules de précipitations, mais sont fort coûteux. Un disdromètre laser-optique (OTT Parsivel<sup>2</sup>), tel qu'utilisé aux fins de cette étude, est utile pour sa portabilité et son faible coût.

## 1.2 Objectifs et approche

L'objectif de cette étude est d'évaluer les vitesses de chute existantes de plusieurs types de cristaux de glace caractérisés par plusieurs degrés de givrage, ainsi que la capacité du disdromètre laser-optique à discriminer ces types de cristaux. Les données utilisées ont été recueillies du 6 au 8 février 2020 où environ 42 mm d'équivalent en eau liquide a été accumulé sur le sud du Québec. Des données d'observations manuelles recueillies au centre-ville de Montréal et plusieurs types de cristaux de neige, incluant plusieurs degrés de givrage ont été enregistrés et photographiés. Ces données manuelles sont comparées aux mesures automatiques d'un disdromètre laser-optique.

Ce mémoire est divisé en 6 chapitres. Le chapitre 1 est l'introduction, suivie du chapitre 2 élaborant la méthodologie et une analyse des conditions synoptiques avec les données de ECMWF ReAnalysis

version 5 (ERA5). Le chapitre 3 porte sur l'analyse des types de cristaux et trace un portrait général des précipitations à l'aide des observations manuelles faites par les étudiants. L'analyse et la quantification des précipitations à l'aide du disdomètre laser-optique sera présenté dans le chapitre 4. Le chapitre 5 portera sur une analyse approfondie des types de cristaux et de l'influence du givrage sur la dimension et vitesse de chute des particules. Une discussion des résultats et une conclusion seront présentées au chapitre 6.



## CHAPITRE 2

### APPROCHE ET MÉTHODOLOGIE

Plusieurs instruments météorologiques installés sur le toit du PK-UQAM (75 m au-dessus du niveau de la mer, AMSL) ont été utilisés pour mener cette étude. Ces instruments sont un disdromètre laser-optique (OTT Parsivel<sup>2</sup>), un Micro Rain Radar 2 (MRR2) et un montage caméra afin de prendre des macrophotographies (Figure 2). Une description de ces instruments et la méthode d'analyse utilisée sont fournies dans cette section.

#### 2.1 Station météorologique standard

Une station météorologique standard munie de divers instruments installés à 75 m au-dessus du niveau de la mer mesure la température, l'humidité, la vitesse et la direction du vent, ainsi que la pression barométrique sont mesurées. La quantité de précipitation en eau liquide est mesurée par un Geonor placé dans un bouclier Alter simple. Les données sont enregistrées aux minutes.

#### 2.2 Disdromètre laser-optique

Le disdromètre laser-optique, OTT Parsivel<sup>2</sup> (Figure 2), mesure la vitesse de chute et la dimension des particules par occultation. Les particules sont captées par un laser horizontal d'une dimension de 180 X 30 mm et d'une hauteur de 1 mm muni d'une photodiode qui convertit la lumière reçue en voltage, qui elle-même est convertie en signal digital sortant. La vitesse de chute est déterminée à partir de la durée d'extinction du signal et la taille, par le degré d'atténuation du signal. Quelques hypothèses sont nécessaires au traitement des données : 1) Les particules ont une forme sphéroïde; 2) Les particules ont leurs axes de symétries alignés verticalement; 3) Une seule particule tombe dans le capteur à la fois; 4) Les particules ont des propriétés d'extinction par rapport à la lumière monochromatique du laser (i.e., que les sont pratiquement opaques); 5) Seulement la composante verticale de la vitesse est considérée dans l'extinction du signal; 6) Les particules partiellement captées, c'est-à-dire à la frontière extérieure de l'aire du laser, ne sont pas considérées comme aberrantes et introduisent des mesures de tailles et de vitesses trop petites. Il est supposé que leur contribution moyenne sur la distribution de taille et les quantités intégrées peut être corrigée par un ajustement de l'aire effective mesurée (Battaglia et al. 2010).

La géométrie changeante des particules à l'état liquide et solide rend la mesure exacte de la vitesse et de la taille difficile. Les données brutes sont discriminées sur une matrice deux dimensions de 32 X 32 représentant le compte des particules distribuées sur 32 classes de vitesses de chute (0 à 20 m s<sup>-1</sup>) et de tailles (0 à 25 mm) à une résolution temporelle de 1 minute. La plus petite taille enregistrée est de 0.25 mm car l'appareil a de la difficulté à détecter les particules plus petites et le rapport signal sur bruit est trop faible. Ces classes de vitesses et de tailles sont proposées par défaut par le fabricant. L'incertitude sur la mesure de taille est de  $\pm 0.1$  mm plus 5% et sur la vitesse est de 25% sur la vitesse de chute de particules ayant des diamètres de 0.3 mm et de 10% pour des particules ayant des diamètres de 5 mm (Löffler-Mang et Joss 2000). Les forces et faiblesses sont explicitées plus largement dans Battaglia et al. (2010).

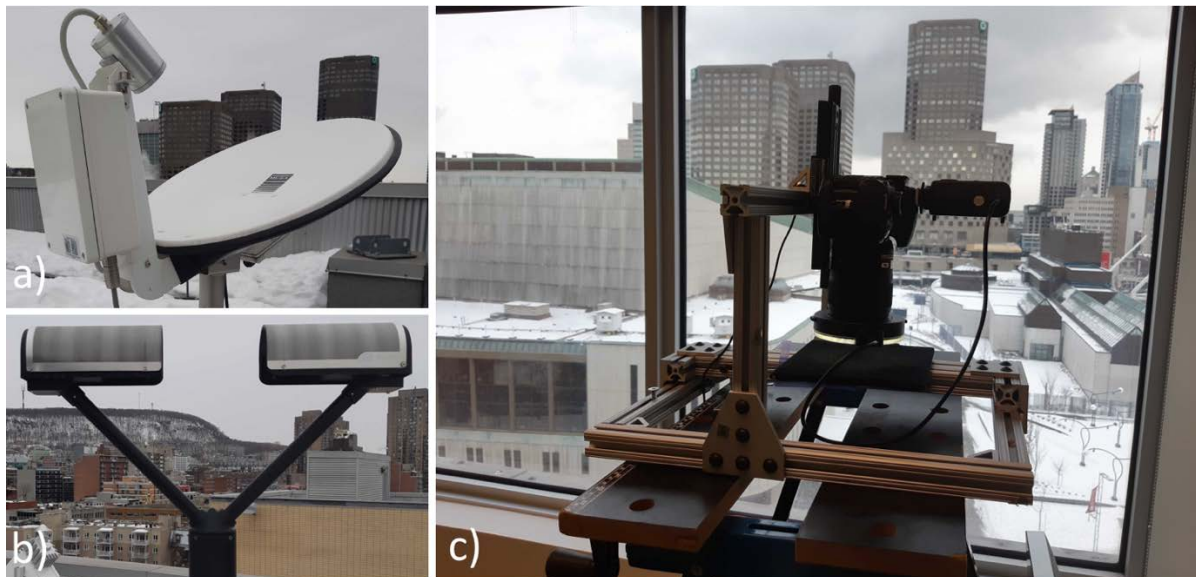


Figure 2. (a) Micro Rain Radar 2 (MRR-2), (b) disdromètre laser-optique, (c) montage caméra pour les macrophotographies.

### 2.3 Micro Rain Radar 2

Un Micro Rain Radar 2 (MRR-2, Figure 2) utilisant une fréquence de 24 GHz (K-Band) FM-CW est utilisé comme profileur vertical. Il permet de mesurer la réflectivité radar ( $Z_e$ ) et la vitesse Doppler sur une colonne verticale jusqu'à 6 km d'altitude. Le MRR2 sur le toit du PK-UQAM opère à une résolution de 200 m à 32 niveaux verticaux avec comme niveau initial 400 m afin d'éviter tout effet avec la surface. La réduction du bruit et la correction de la vitesse verticale en

cas de forts mouvements ascendants sont traitées systématiquement par l'algorithme de Maahn et Kollias (2012). Le MRR permet également d'identifier la couche de fonte en altitude à l'aide de la réflectivité. Celle-ci est associée avec un maximum de réflectivité en altitude appelée la bande brillante (Battan 1973; Fabry et Zawadzki 1995). La connaissance de la présence d'une couche de fonte et de sa hauteur ont été utilisées afin d'évaluer la phase parfois ambiguë des hydrométéores se trouvant dans les macrophotographies (voir sous-section 2.4).

## 2.4 Macrophotographies

Les particules de précipitation ont été photographiées systématiquement en suivant la méthode proposée par Gibson et Stewart (2007). Un appareil Nikon Digital D80 SLR équipé d'une lentille macro de 60 mm et munie d'un flash circulaire fut utilisé (Figure 2). L'appareil était ajusté à son réglage de focus le plus bas et utilisé à  $f/29$  afin d'avoir une profondeur de champ maximale. Les particules étaient collectées toutes les 10 minutes sur une plaquette recouverte d'une pellicule de velours noir. La plaquette était laissée à l'extérieur afin d'éviter la fonte des particules et placée dans une boîte ouverte afin de limiter l'effet du vent horizontal lors de la collecte. La caméra était installée sur un montage vertical avec une plaque amovible où une série de 9 photographies en serpentín étaient prises pour couvrir un maximum de surface de la plaquette de collection. Ces 9 photographies étaient prises toutes les 10 minutes.

Durant la tempête majeure du 6-8 février 2020 d'une durée de 42 heures, un total de 2268 macrophotographies aurait dû être pris. La calibration de l'appareil photo entre 2130-2230 UTC le 8 février 2020, ainsi que l'omission des observateurs de prendre certaines des 9 photographies à certain pas de temps explique que nous avons récolté un total de 2169 macrophotographies durant l'événement de précipitation. Un protocole d'analyse en 6 étapes a été appliqué à chacune des photos (Tableau 2). Tous les types de cristaux observés ont été répertoriés dans un fichier Excel par le ou les symboles associés aux types inscrits dans le Tableau 3, ce qui constituait la première étape du protocole. Les types de cristaux utilisés sont décrites dans le Tableau 3 et des exemples recueillis à travers les macrophotographies sont présentés à la Figure 3. La deuxième étape consistait à discriminer la ou les particule(s) en prépondérance(s) dans chacune des photos. Une macrophotographie avec un seuil d'occurrence de plus de 70% pour un seul type était considéré comme dominant et ce type singulier était catalogué dans le fichier. La combinaison de deux types

de cristaux dominants a été répertoriée lorsque leur occurrence respective se retrouvait entre 40-60%. La troisième étape était de noter tous les types de particules givrées en présence sur chacune des photos. La quatrième étape était d’attribuer un taux de givrage sur une échelle de 0 à 5 pour chacun des types de cristaux suivant la méthodologie de Mosimann et al. (1994). Les taux de givrage sont décrits dans le Tableau 4 et des exemples recueillis de chacun des modes de givrages sont illustrés à la Figure 4. La cinquième étape était d’attribuer un degré de givrage à chaque photo suivant la même méthodologie de givrage. La dernière étape était de mesurer le degré d’agrégation en attribuant une note de 0 à 3 (Figure 5).

Tableau 2. Description des étapes d’analyse des macrophotographies.

Étape	Description
1	Noter dans un fichier Excel le ou les types de cristaux en présence dans la macrophotographie suivant les symboles du Tableau 3.
2	Noter dans le fichier Excel le ou les types de cristaux qui se trouvaient en prépondérance dans la macrophotographie à l’aide du symbole approprié.
3	Noter dans le fichier Excel le ou les types de cristaux qui étaient givrés à l’aide du symbole approprié.
4	Attribuer un score de givrage entre 0 et 5 à chacun des types en présence suivant la méthodologie du Tableau 4.
5	Attribuer un score de givrage global de la macrophotographie de façon qualitative en suivant la méthodologie du Tableau 4.
6	Noter le degré d’agrégation entre 0 et 3 suivant la méthodologie de la Figure 5.

Tableau 3. Définition des types de cristaux de glace analysées lors de cette étude.

Types	Symboles	Description
Dendrite <sup>a</sup>	D	Cristal développé sur le plan basal du système cristallographique hexagonal avec 6 branches.
Aiguille <sup>a</sup>	N	Long et mince cristal montrant la croissance de piliers parallèles les uns les autres. Fréquemment retrouvé en combinaison formant des X.
Colonne <sup>a</sup>	C	Cristal qui croit dans la direction principale de l'axe de cristallisation. Petit prisme hexagonal de glace translucide. Ils peuvent parfois contenir des cavités.
Neige-roulée	G	Particule de glace densément givrée.
Plaque <sup>a</sup>	P	Cristal se développant sur le plan basal du système cristallographique hexagonal.
Grésil <sup>b</sup>	IP	Type de précipitation en forme de sphères glacées transparentes ou translucides. D'un diamètre de 5 mm ou moins.
Irrégulier <sup>a</sup>	I	Cristal avec aucune habitude de croissance définie.

a. De *Nakaya* [1938]

b. De *Glickman* [2000]



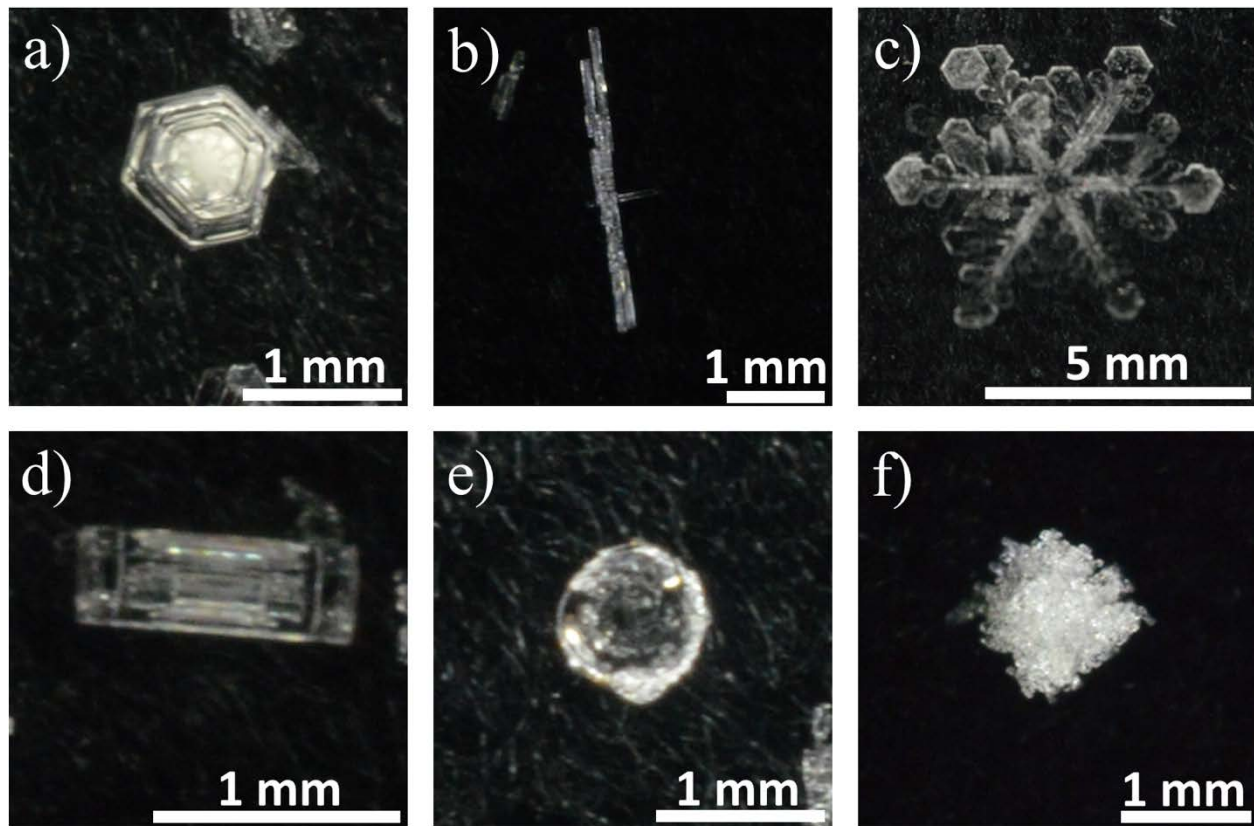


Figure 3. Types de cristaux discriminés lors de l'analyse des macrophotographies : a) Plaque, b) aiguille, c) dendrite, d) colonne, e) grésil et f) neige roulée.

Tableau 4. Degrés de givrage adapté de Mosimann et al. (1994).

Stage	Couverture	Critère
Givrage = 0 (Non givré)	0%	Aucune gouttelette de nuage sur la surface du cristal
Givrage = 1 (Légèrement givré)	$\leq 25\%$	Quelques gouttelettes à la surface du cristal, habituellement dispersées.
Givrage = 2 (Modérément givré)	$\approx 50\%$	Environ la moitié de la surface est couverte de gouttelettes.
Givrage = 3 (Densément givré)	$\approx 100\%$	Le cristal entier est recouvert ou presque entièrement d'une couche de gouttelettes.
Givrage = 4 (Fortement givré)	$> 100\%$	La forme du cristal d'origine est à peine reconnaissable et la surface n'est plus visible. Plusieurs couches de gouttelettes recouvrent le cristal.
Givrage = 5 (Neige roulée)	$\gg 100\%$	Tous les types de neige roulée : Hexagonale, conique et « lump ».

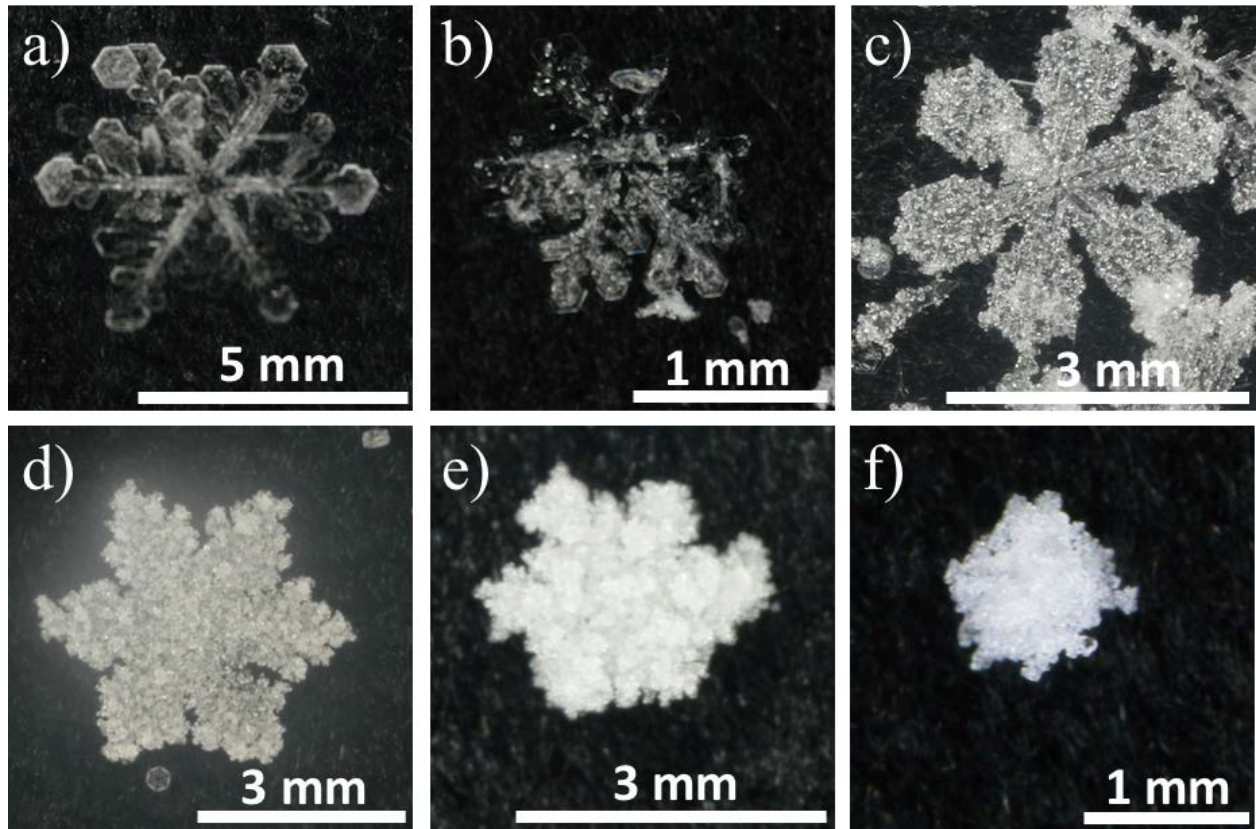


Figure 4. Six degrés de givrage suivant la méthodologie de Mosimann et al. (1994) résumé dans le Tableau 4 sont présentées : a) dendrite non-givrée (0), b) dendrite légèrement givrée (1), c) dendrite modérément givrée (2), d) dendrite densément givrée (3), e) dendrite fortement givrée (4) et f) une particule de neige roulée (5). Crédit macrophotographies : équipe de recherche à Julie M. Thériault.

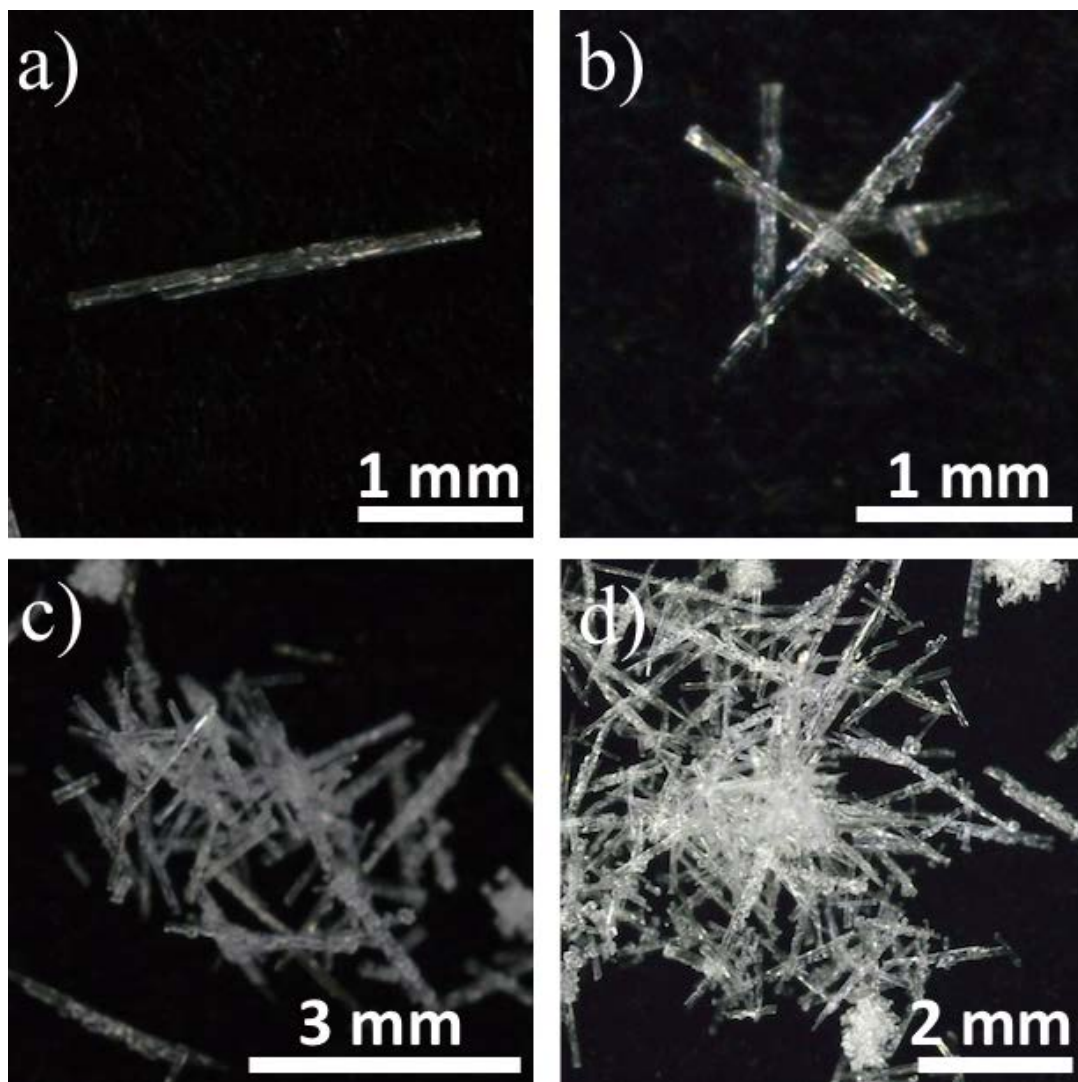


Figure 5. Scores d'agrégation : a) Agrégation de 0 (cristal singulier), b) agrégation de 1 (2 à 10 cristaux), c) agrégation de 2 (10 à 50 cristaux) et d) agrégation de 3 (> 50 cristaux).

Un exemple d'analyse de macrophotographie est proposé à la Figure 6 suivant les six étapes du Tableau 2: 1) Noter la présence de chacun des types de cristaux, ici les colonnes (C), la neige roulée (G), les dendrites (D) et les plaques (P); 2) On note un type prédominant, ici les colonnes (C); 3) On note tous les types de cristaux qui étaient givrés soient les colonnes (C), la neige roulée (G) et les dendrites (D); 4) On attribue un score de givrage à chacun des types givrés suivant la méthodologie du Tableau 4, 2 pour les colonnes, 5 pour la neige roulée et 3 pour les dendrites; 5) On attribue un score global de givrage de l'entièreté de la microphotographie : ici environ 2.5 ; 6).

À chacun des types est associé un score de givrage de façon qualitative suivant les degrés décrits au Tableau 4.

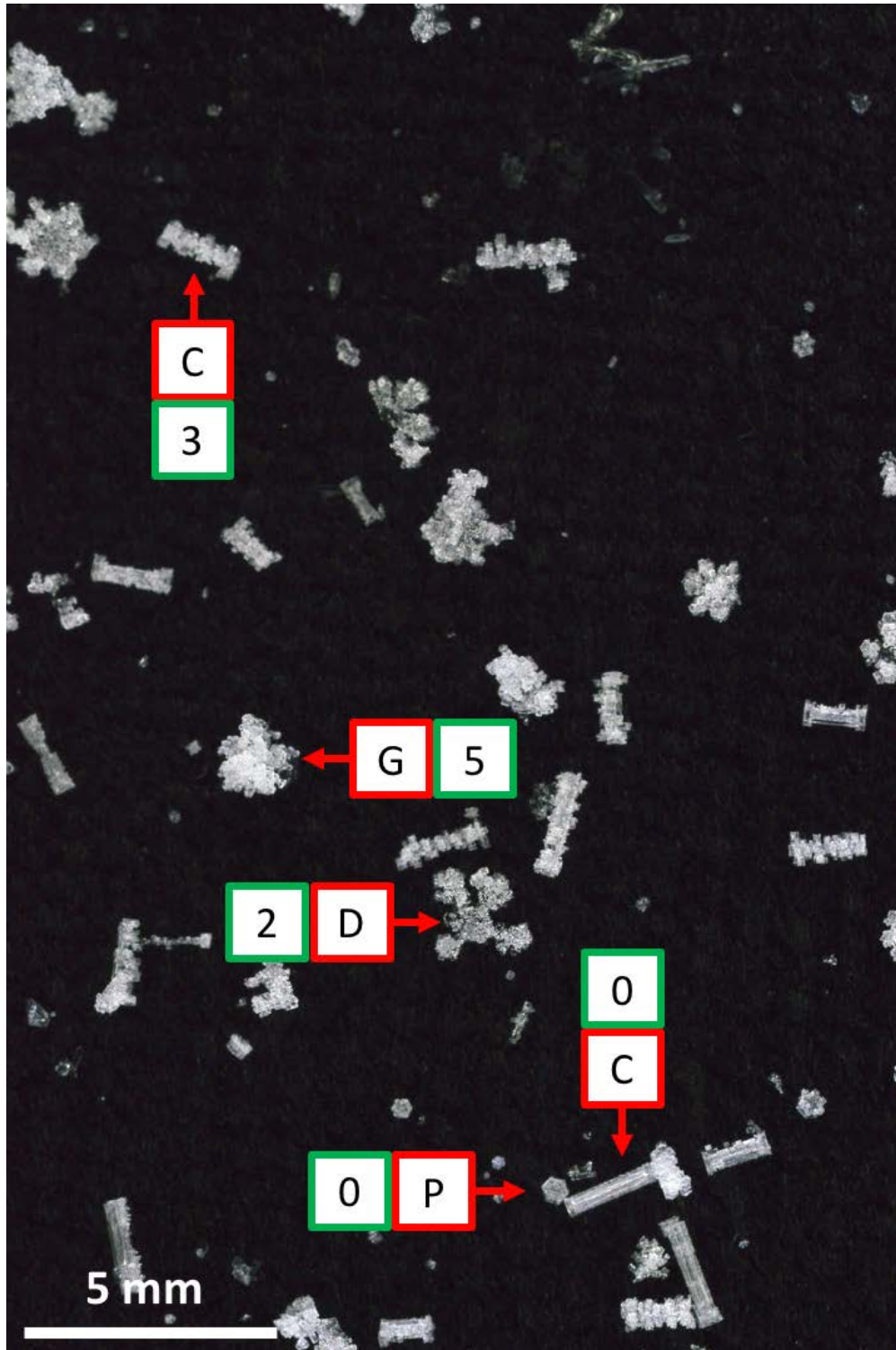


Figure 6. Protocole d'analyse des macrophotographies. Les types sont notés par leur lettre correspondante et encadrés en rouge, soit D pour dendrite, P pour plaque, G pour neige roulée et C pour colonne. Le degré de givrage suivant Mosimann et al. (1994) est indiqué dans l'encadré vert.

## 2.5 Réanalyse

Les données de ECMWF ReAnalysis version 5 (ERA5, Hersbach et al. 2020) ont été utilisées afin d'analyser la formation et la propagation de la dépression qui a amené ces précipitations. La résolution spatiale des données est de  $0.25^\circ$  ( $\sim 31$  km) avec une résolution temporelle d'une heure à 137 niveaux verticaux (Hersbach et al. 2020). Ces données ont été utilisées pour produire les cartes de pression de surface, la distribution de la température à 850 hPa et les vents, le tourbillon absolu à 500 hPa et la hauteur du géopotential et les vents à 250 hPa. Des profils de température et d'humidité à chaque heure de 1000 UTC le 6 février 2020 à 0400 UTC le 8 février 2020 ont été produits afin d'analyser les possibles changements de phases des précipitations.

## 2.6 Événement météorologique étudié

Une tempête de neige a touché le sud du Québec du 6-8 février 2020 et a produit environ 45 mm de précipitation en équivalent en eau liquide durant 42 h. La Figure 7 montre l'évolution temporelle de six variables issues de divers instruments sur le toit du PK-UQAM. On note une température moyenne de  $-5.8$  °C pour l'ensemble de l'événement avec un minimum  $-8.6$  °C et un maximum de  $-3.7$  °C. On remarque une augmentation graduelle de la température associée au front chaud de 1630 UTC le 6 février 2020 jusqu'à environ 1100 UTC le 7 février 2020 où la température commença à décroître avec l'advection froide en amont de la dépression (Figure 8). L'humidité relative était minimale au début de l'évènement à 52.1 % jusqu'à 1030 UTC le 6 février où elle augmenta et oscilla autour de 80% pour le reste de l'évènement avec un maximum de 88.9 % en phase avec l'augmentation de la température. De 1000 UTC le 6 février à 0500 UTC le 7 février les taux de précipitations étaient faibles, soit inférieure à  $2$  mm h<sup>-1</sup> pour ensuite osciller autour de cette valeur et atteindre un maximum d'environ  $5.0$  mm h<sup>-1</sup> près de 1200 UTC le 7 février. C'est également à ce moment où l'on enregistrait également le pic de réflectivité radar avec des valeurs près de 30 dBz (Figure 7). On observe aucune couche de fonte sur l'ensemble de la durée de l'évènement. On note également les plus fortes valeurs de mouvements verticaux de 0500-1000 UTC le 7 février 2020 associés à l'occurrence de grésil observé à la surface.

Un creux en altitude provenant du Golfe de l'Alaska s'est propagé vers l'est et s'est amplifié par conservation du tourbillon en passant au-dessus des Rocheuses canadienne à 1000 UTC le 6 février

2020 (Figure 8). Ce patron a permis la formation d'une basse pression au niveau du golfe du Mexique qui a touché la surface au sud de l'Alabama (Figure 8) à 1000 UTC le 6 février 2020. Cet alignement sud-ouest nord-est du courant jet était associé à de forts flux de vapeur d'eau puisant humidité et chaleur des tropiques. La station PK-UQAM enregistrait de faible taux de précipitation à Montréal environ une heure plus tard, soit à 1100 UTC le 6 février 2020 (Figure 7).

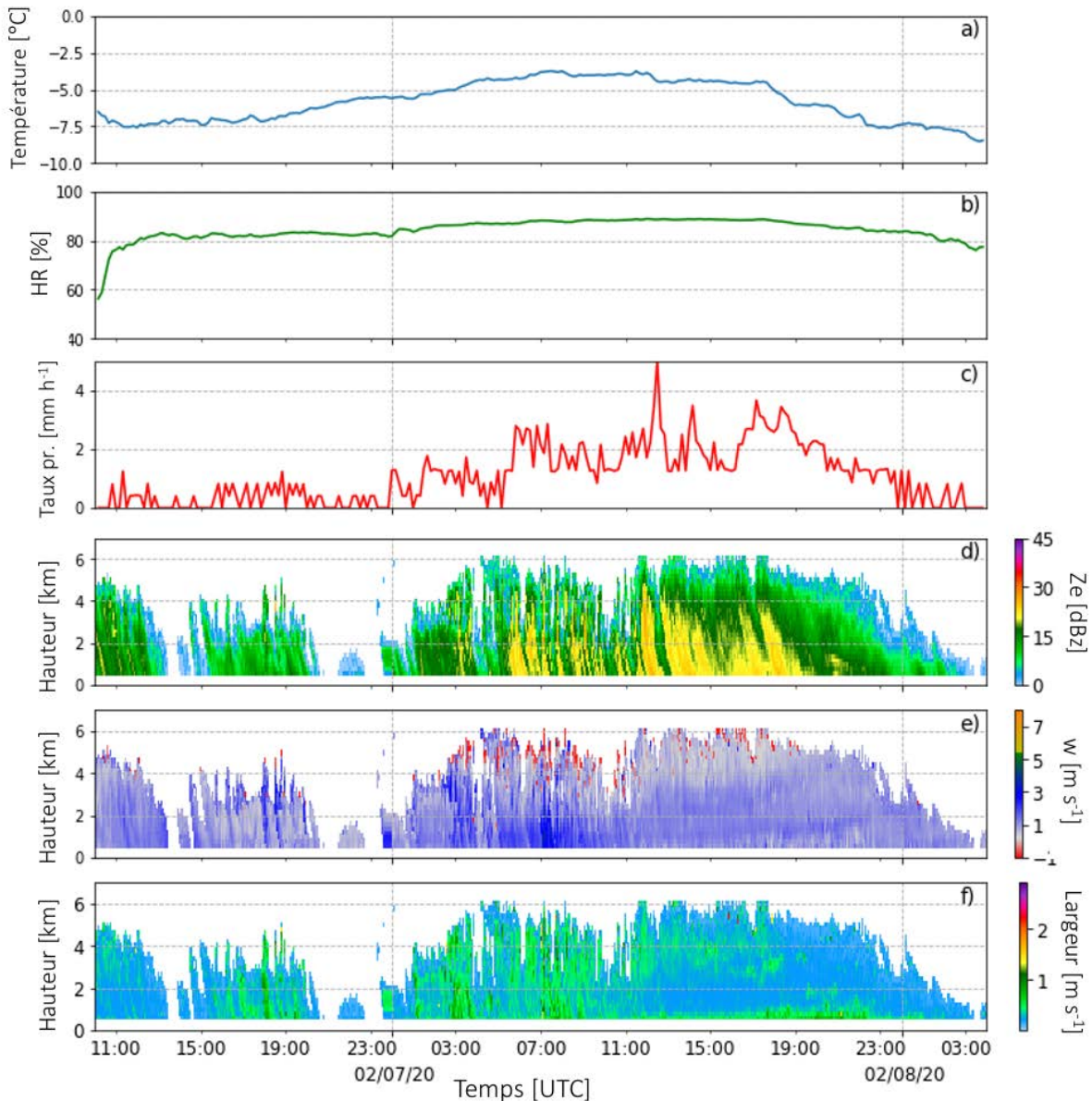


Figure 7. Évolution temporelle de : a) Température (75 AMSL), b) humidité relative (%), c) taux de précipitation ( $\text{mm h}^{-1}$ ), d) Réflectivité radar du MRR2 (dBz), e) Vitesse Doppler du MRR2 ( $\text{m s}^{-1}$ ) et f) largeur spectrale du MRR2 entre le 1000 UTC 6 février et 0400 UTC 8 février 2020.

Le système continua de se propager le long de la côte est Américaine puisant humidité et chaleur du Gulf Stream et se creusant davantage de 1000 hPa à 988 hPa entre 1000 UTC le 6 février année et 1000 UTC le 7 février année (Figure 8) atteignant Washington (DC). À 1100-1200 UTC e 7 février 2020, la station a enregistré les plus forts taux de précipitations de l'événement (Figure 7) associé à la phase mature du cyclone où une forte advection chaude en aval du creux (Figure 8) a favorisé les mouvements verticaux. La crête en altitude s'est amortie entre 1000 UTC le 7 février à 1000 UTC le 8 février 2020 et le système s'est propagé davantage sur St-John's (NL) pour se dissiper au niveau de la péninsule Groenlandaise dans la mer du Labrador. Les précipitations cessèrent vers 0400 UTC le 8 février 2020 à Montréal.



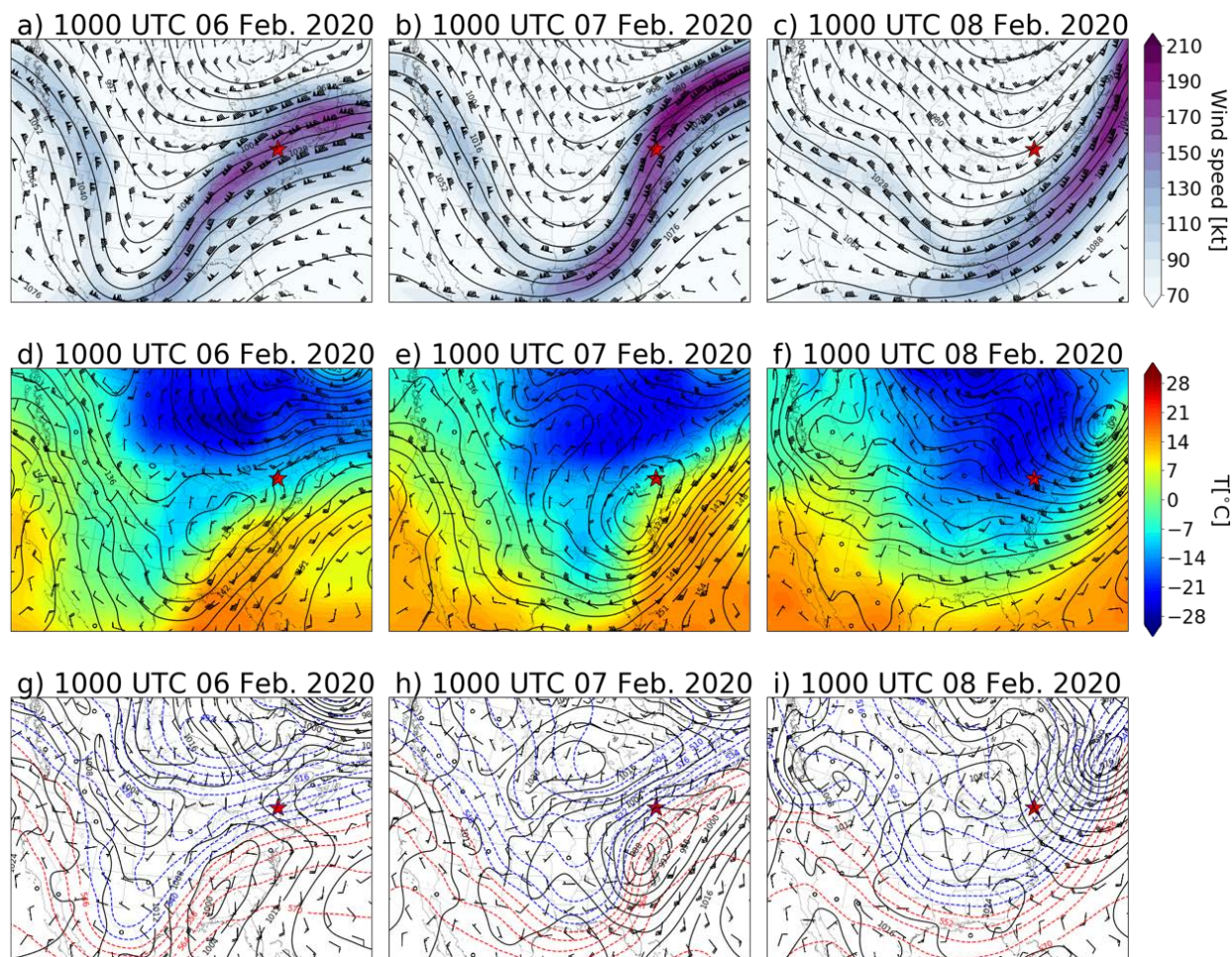


Figure 8. Données de réanalyse ERA5. L'étoile rouge indique l'emplacement de Montréal. (a-c) la hauteur du géopotential (ligne pleine) et vents (kt) à 250 hPa. (d-f) Température (couleur), vent (kt) et la hauteur du géopotential (ligne pleine) à 850 hPa. (g-i) Pression de surface (ligne pleine) et épaisseur entre 1000-500 hPa (lignes pointillées). Réanalyse valide à 1000 UTC 6 février 2020 (a, d et g), à 1000 UTC 7 février 2020 (b, e et h) et 1000 UTC 8 février 2020 (c, f et i).

## 2.7 Vitesse de chute utilisée

Les spectres de vitesses en fonction du diamètre ont été analysés pour chacun des types de cristaux de glace observés manuellement énumérés dans le Tableau 3. La somme des mesures du disdromètre laser-optique a été réalisée toutes les 10 minutes pour corroborer les observations manuelles qui étaient réalisées à ces itérations. Un ou deux types dominants de cristaux ont été

identifiés et assignés pour chacune de ces périodes de 10 minutes. Ainsi, les données du disdromètre laser-optique et des observations manuelles ont pu être utilisées conjointement.

De plus, chacun des pas de temps associés à chacun des types de cristaux de glace a été discriminé et utilisé afin de réaliser les spectres de vitesse en fonction du diamètre. La médiane, les 5<sup>e</sup>, 25<sup>e</sup>, 75<sup>e</sup> et 95<sup>e</sup> percentiles ont été produits et superposés aux spectres de vitesses. La médiane était considérée comme représentative de l'échantillon de 10 minutes associée à un seul type dominant et comparée aux courbes théoriques associées à chacun des types de cristaux de glace trouvés dans la littérature (Rasmussen et al. 1999 ; Locatelli et Hobbs 1974 ; Heymsfield et Kajikawa 1987; Barthazy et Schefold 2006; Vázquez-Martín et al. 2021).

Les vitesses de chutes théoriques utilisées sont données dans le Tableau 5. La Figure 9 montre les vitesses de chute trouvées dans la littérature scientifique pour les types de cristaux de glace observés durant l'évènement documenté. On remarque que pour les dendrites (Figure 9a), les courbes de Nakaya (1954), Heymsfield et Kajikawa (1987) et Vázquez-Martín et al. (2021) se croisent et sont similaires sur l'ensemble de la distribution de tailles. Les courbes de Barthazy et Schefold (2006) prennent en compte les particules givrées et se distinguent des trois autres courbes théoriques. Similairement pour les aiguilles (Figure 9b), les courbes de Rasmussen et al. (1999) et de Vázquez-Martín et al. (2021) convergent pour l'ensemble de la distribution de tailles. Les courbes de Barthazy et Schefold (2006) prennent en compte trois régimes de givrage et on remarque que les vitesses de chute en fonction du diamètre augmentent avec l'augmentation du givrage. Les colonnes courtes et les colonnes longues (Rasmussen et al. 1999) et la courbe de Vázquez-Martín et al. (2021) sont bien distinguables et leur vitesse varient beaucoup en fonction du diamètre (Figure 9c). Les colonnes courtes sont très denses en comparaison aux colonnes longues et elles ont tendance à chuter plus rapidement pour des diamètres plus grands que 1 mm. Similairement pour les plaques épaisses (Heymsfiel et Kajikawa 1987), les plaques hexagonales (Heymsfiel et Kajikawa 1987) et les plaques de Vázquez-Martín et al. (2021) on remarque une différence marquée pour des diamètres supérieurs à 1 mm pour les mêmes raisons (Figure 9d). La neige roulée (Figure 9e) de l'évènement est comparée à trois courbes théoriques (Locatelli et Hobbs 1974; Heymsfiel et Kajikawa 1986; Vázquez-Martín et al. 2021) lesquelles convergent 4.25 mm et divergent par la suite (Figure 9f). L'absence de courbe théorique dans la littérature décrivant le

grésil nous amène comparer ce type avec la pluie (Figure 9f, Atlas et al. 1977), la neige sèche et la neige mouillée/givrée tirée de Rasmussen et al. (1999).

Tableau 5. Vitesse terminale en fonction du diamètre adapté de Rasmussen et al. (1999).  $v$  est en  $m s^{-1}$  et  $D$  en mm.

Type de cristal		Vitesse terminale [ $m s^{-1}$ ]				Source
Symbole	Type	$v = aD^b$		$v = a(1-\exp(-bD))$		
		a	b	a	b	
D	Dendrite	0.3	0			Nakaya (1954)
		0.18	0.48			Heymsfiel et Kajikawa (1987)
		0.23	0.99			Vázquez-Martín et al. (2021)
				1.29	1.58	Barthazy et Schefold (2006)
					1.3	2.44
N	Aiguille	0.17	0.80			Rasmussen et al. (1999)
		0.35	-0.15			Vázquez-Martín et al. (2021)
				1.1	2.86	Barthazy et Schefold (2006)
				1.54	2.3	Barthazy et Schefold (2006)
				2.13	1.92	Barthazy et Schefold (2006)
C	Colonne	1.22	1.09			Rasmussen et al. (1999)
		1.20	0.80			Rasmussen et al. (1999)
		0.34	0.12			Vázquez-Martín et al. (2021)
P	Plaque	0.40	0.86			Heymsfiel & Kajikawa (1987)
		0.51	0.39			Vázquez-Martín et al. (2021)
				1.18	2.68	Barthazy et Schefold (2006)
				1.5	2.24	Barthazy et Schefold (2006)
G	Neige roulée			1.88	1.5	Barthazy et Schefold (2006)
		1.3	0.66			Locatelli & Hobbs (1974)
		0.94	0.89			Heymsfiel & Kajikawa (1987)
		1.07	1.00			Vázquez-Martín et al. (2020)
R	Pluie	3.78	0.67			Atlas et al. (1977)
DS	Neige sèche	0.67	0.2			Rasmussen et al. (1999)
WS	Neige mouillée	1.35	0.2			Rasmussen et al. (1999)

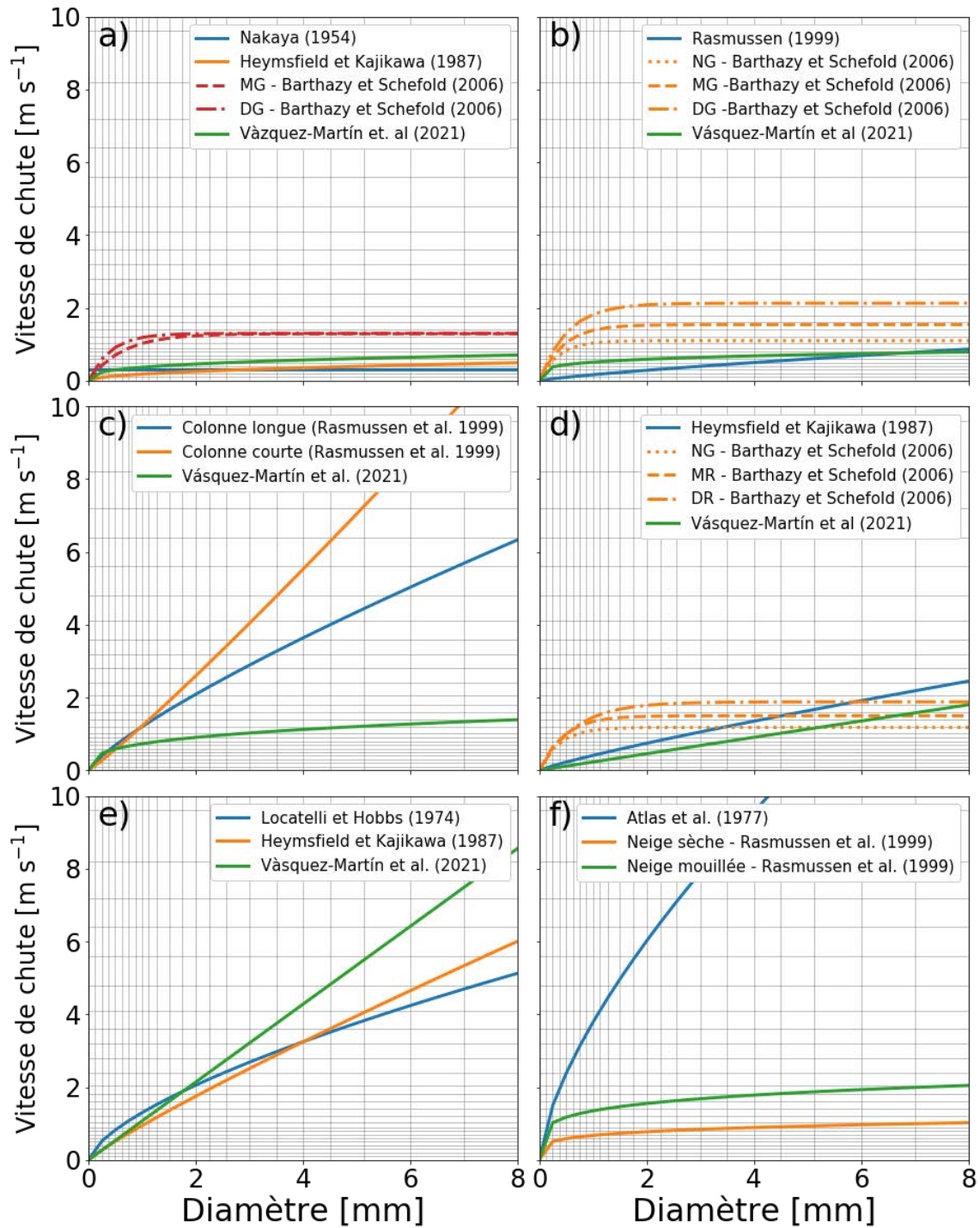


Figure 9. Courbes théoriques définies dans le Tableau 5 pour : a) les dendrites, b) les aiguilles, c) les colonnes, d) les plaques, e) la neige roulée et f) le grésil. NG est pour non-givré, MR est pour modérément givré et DR est pour densément givré.



## CHAPITRE 3

### ANALYSE DES OBSERVATIONS MANUELLES

Dans cette section, une analyse détaillée des caractéristiques microphysiques des hydrométéores est proposée. Une analyse des observations manuelles des types de cristaux sera élaborée quant à l'occurrence et l'évolution des divers types de cristaux durant l'événement.

#### 3.1 Évolution des types de cristaux issus des observations manuelles

L'occurrence et l'évolution des types de cristaux de glace entre 1000 UTC le 6 février 2020 et 0400 UTC le 8 février 2020 sont représentées à la Figure 10. L'occurrence de tous les types de cristaux de glace du Tableau 3 a été observée durant l'évènement de précipitations. Nous avons observé qu'un ou deux type(s) étaient généralement dominants (Figure 10) avec des fractions traces de certains autres types de cristaux.

Les 42 heures de précipitations sont scindées en 7 périodes (Tableau 6). Ces périodes caractérisées par l'occurrence des types dominants sont les suivantes.

- La première période de précipitations (Figure 10), soit de 1000 UTC à 1040 UTC le 6 février 2020, était caractérisée par la présence de neige roulée et de cristaux irréguliers givrés et non givrés. À l'aide d'une règle qui a été prise en photo lors du calibrage de la caméra, il était possible d'approximer à l'œil la taille des particules dans les macrophotographies. Le diamètre des particules de neige roulée était en moyenne d'environ 2 mm. Une transition vers des dendrites non givrées a été observée entre 1030 UTC et 1040 UTC le 6 février 2020.
- La deuxième période de précipitations (Figure 10, 1040-1330 UTC le 6 février 2020) était dominée par des dendrites non givrées et fortement givrées (Tableau 6) ainsi que de la neige roulée ayant un diamètre moyen d'environ 2 mm. De 1040 UTC à 1150 UTC, la majorité des particules étaient des fragments de dendrites suivis de cristaux irréguliers densément givrés, et des dendrites. De 1150 – 1330 UTC, une transition est survenue où une fraction d'occurrence de 50% de neige roulée et de dendrite non givrées et fortement givrées a été

observé. Une grande quantité de dendrites avaient des branches brisées, ce qui expliquerait la présence la variation de givrage observée sur les fragments de dendrites.

- La troisième période de précipitations (Figure 10, 1330 et 1530 UTC le 6 février 2020) était caractérisée par la présence de petites particules de grésil (~ 1 mm) et de neige roulée. De 1330 à 1430 UTC la majorité des particules étaient de la neige roulée d'environ 1 à 2 mm. Le grésil a commencé vers 1410 UTC pour devenir le type dominant entre 1430-1450 UTC. Le type de précipitation a ensuite changé en neige roulée, accompagné de petites particules de grésils jusqu'à 1530 UTC. Malheureusement, aucune donnée du disdromètre laser-optique n'est disponible entre 1330 à 1530 UTC.
- La quatrième période de précipitations (Figure 10) s'est déroulée de 1530 UTC le 6 février 2020 au 0700 UTC le 7 février 2020. C'est la plus longue période observée. Cette période était caractérisée par la présence dominante d'aiguilles non givrées et de colonne non-givrées et givrées (faible à modérer). La longueur de l'axe majeur des aiguilles et des colonnes était entre 1 et 3 mm. En particulier, les colonnes modérément givrées ont été enregistrées entre 1530 et 1610 UTC le 6 février 2020 et ce sont changées en aiguilles non givrées et givrées légèrement vers 0700 UTC le 7 février 2020. De la neige roulée a été observée à ce moment.
- La cinquième période de précipitations (0700 UTC au 1200 UTC le 7 février 2020) était caractérisée par la présence dominante de grésil non givrée à légèrement givrée combiné avec des aiguilles. Cette période est associée à des vitesses de chute les plus élevées enregistrées.
- La sixième période de précipitations a commencé vers 1155 UTC le 7 février 2020 et s'est terminée vers 1430 UTC le 7 février 2020. Cette période était plus difficile à caractériser que les autres dus à l'occurrence de plusieurs types distincts, soit des dendrites non givrées, des colonnes, des aiguilles et des fragments de dendrites et des fragments irréguliers de particules parfois non givrées et parfois fortement givrées.



- La septième période de précipitations était marquée par des plaques et des dendrites non givrées qui ont débuté à 1430 UTC le 7 février 2020. Entre 2140 UTC et 2240 UTC le 7 février 2020, aucune macrophotographies n'a été prise due à la calibration de la caméra et donc aucun type n'a pu être vérifié au sol à partir de ces photos. Néanmoins des Observations manuelles qualitatives effectuées par les étudiants sur le terrain ont pu combler ce manque d'information. De 2350 UTC le 7 février à 0130 UTC le 8 février, des colonnes capuchonnées et des *bullets* ont été observés.

Les fractions d'occurrences des différents types de cristaux de glace observés sur les macrophotographies prises sur le toit du PK-UQAM (75 AMSL) sont illustrées sur la Figure 11. On remarque que les types de cristaux majoritaires sont les aiguilles (20.4 %), les irréguliers (18.8 %), les colonnes (16.9 %) et la neige roulée (16.3 %) en ordre décroissant, respectivement. Les dendrites, les plaques et le grésil ont respectivement des fractions d'occurrences de 11%, 8.6 % et de 8.1 %.

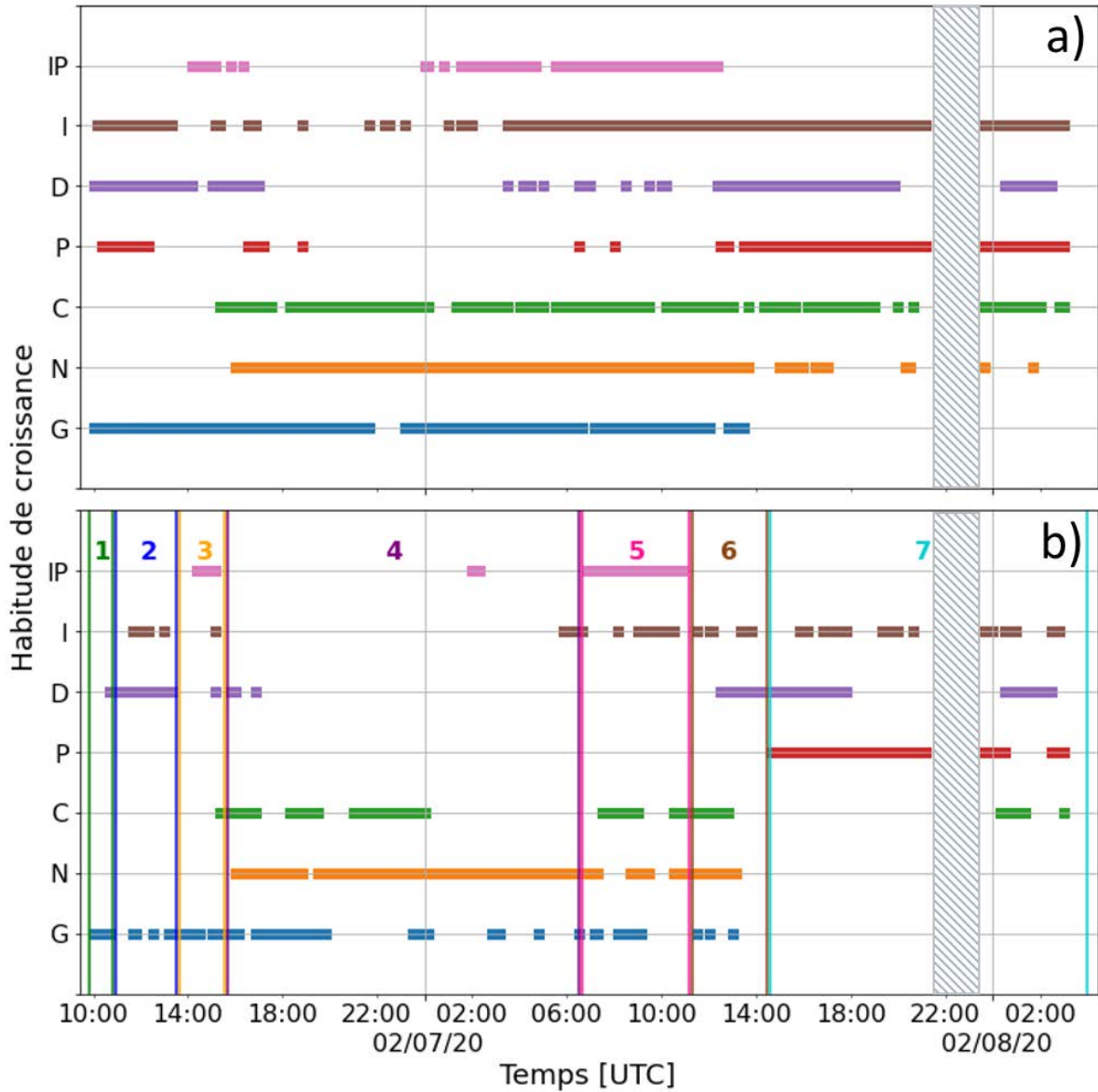


Figure 10. Évolution temporelle des a) types de cristaux observés et des b) types de cristaux dominants. Les zones hachurées représentent un moment où aucune photo n'était disponible. L'axe y représente les types de cristaux de glace; IP est grésil, I est irrégulier, D est pour dendrite, P est pour plaque, C est pour colonne, N est pour aiguille et G est pour neige roulée. Chacun des types de cristaux est défini dans le Tableau 3.

Tableau 6. Évolutions de l'occurrence des types de cristaux de glace scindée en 7 périodes durant l'événement de précipitation valide de 1000 UTC 2020-02-06 à 0400 UTC 2020-02-08.

Période	Types observés	$\Delta t$
1	G, I	1000 – 1040 UTC 2020-02-06
2	D, G	1040 – 1330 UTC 2020-02-06
3	IP, G	1330 – 1530 UTC 2020-02-06
4	N, C	1530 UTC 2020-02-06 à 0700 UTC 2020-02-07
5	IP, N	0700 – 1200 UTC 2020-02-07
6	D,I,N,C	1200 – 1430 UTC 2020-02-07
7	D, P	1430 UTC 2020-02-07 à 0400 UTC 2020-02-08

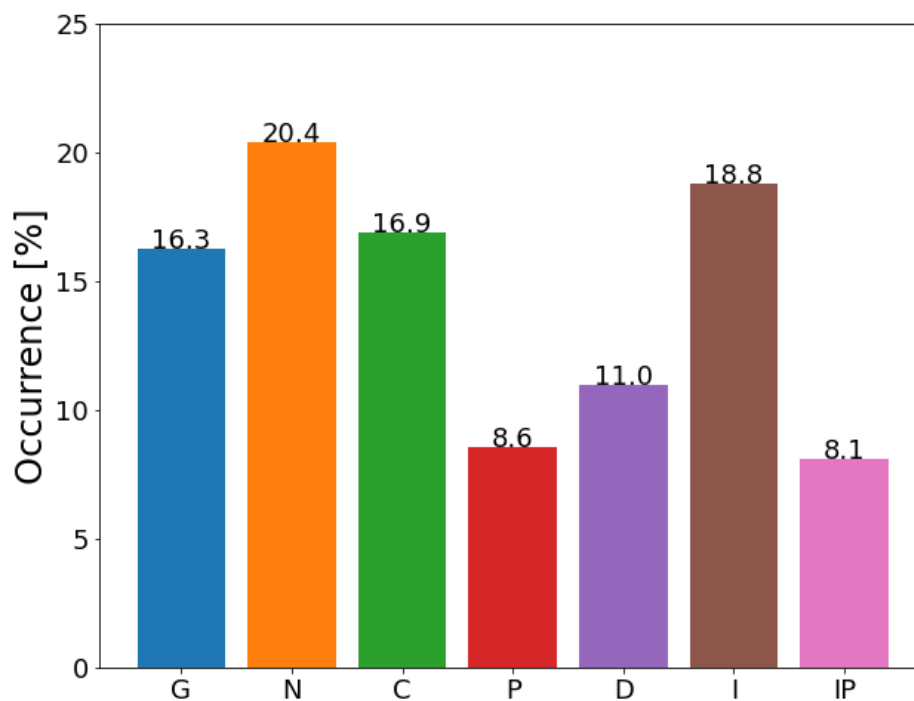


Figure 11. Fraction d'occurrence des habites de croissances suite à l'analyse des 2167 macrophotographies entre 1000 UTC 2020-02-06 à 0400 UTC 2020-02-08. G représente la neige roulée, N les Aiguilles, C les colonnes, P les plaques, D les dendrites, I les irréguliers et IP le grésil.



## CHAPITRE 4

### ANALYSE DE LA VITESSE DE CHUTE ET DIMENSION DES PARTICULES DE PRÉCIPITATION MESURÉES AUTOMATIQUEMENT

Une analyse approfondie de l'évolution des caractéristiques dynamiques des hydrométéores mesurés automatiquement par le disdromètre laser-optique est présentée dans ce chapitre.

#### 4.1 Analyse des caractéristiques dynamiques des types de cristaux

La Figure 12 montre l'évolution des diamètres et vitesses de chute des particules de précipitations durant l'évènement. On remarque que la dimension des particules varie durant l'évènement pour atteindre jusqu'à 20 mm de diamètre. En revanche, la majorité des particules ont une dimension d'environ 1 mm tout au long de l'évènement. Pour la vitesse de chute, on remarque aussi une variation des valeurs maximales allant jusqu'à  $12 \text{ m s}^{-1}$ . Ces vitesses de chute très élevées sont associées à un nombre très faible de particules (Annexe A). En revanche, le spectre de valeurs associé aux vitesses de chute de la plupart des particules est plus large que pour les dimensions. Il oscille entre  $0.25 \text{ m s}^{-1}$  à  $4 \text{ m s}^{-1}$ .

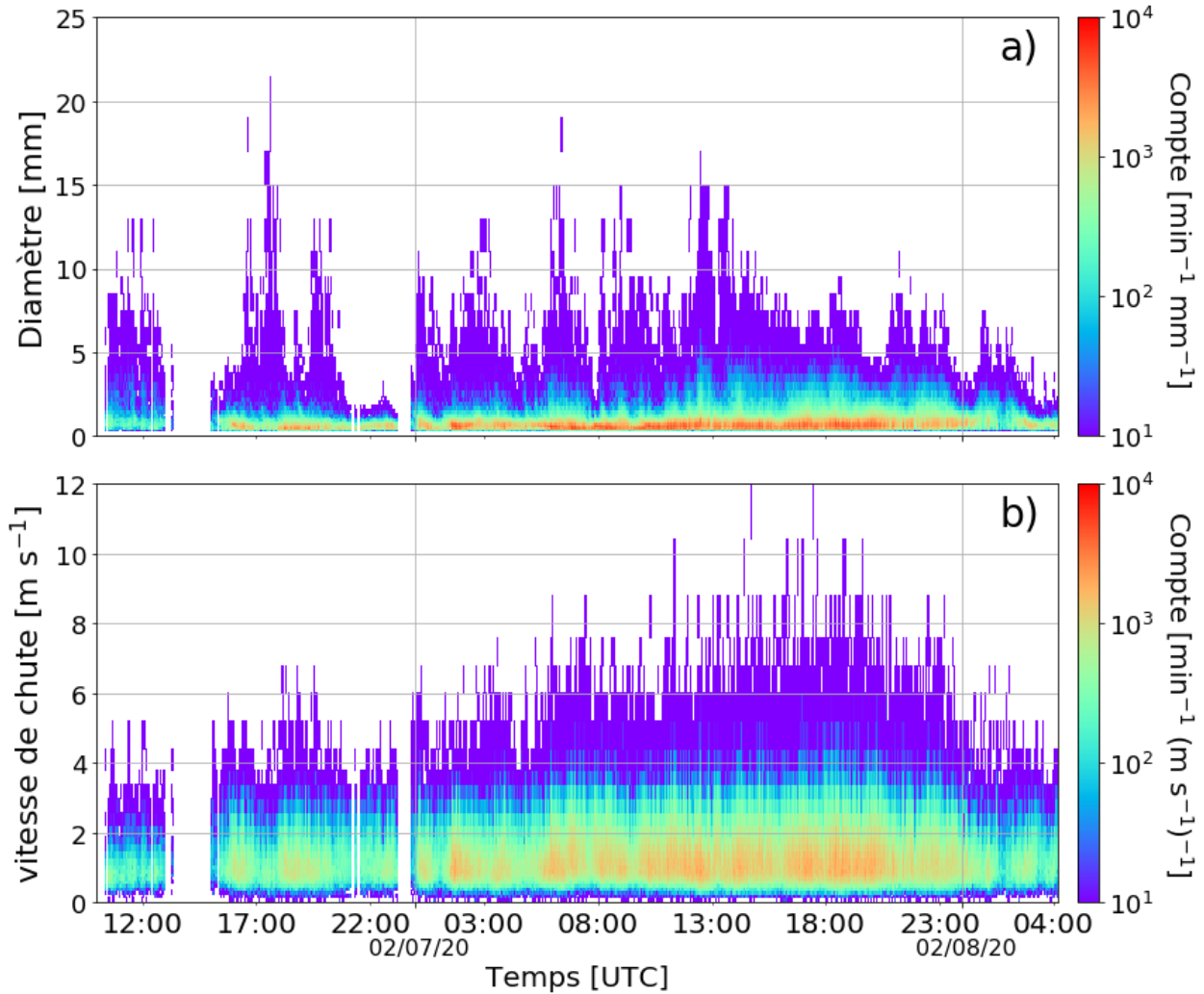


Figure 12. En couleur est représenté le compte du nombre de particules normalisées par la largeur des bins pour les différentes gammes de : a) diamètres [mm] et b) de vitesses [m s<sup>-1</sup>]. Valide de 1000 UTC le 6 février 2020 à 0400 UTC le 8 février 2020.

Les distributions globales de la taille et de la vitesse des particules sont illustrées à la Figure 13. La moyenne globale de diamètre est 0.84 mm et la vitesse moyenne globale d'environ 1.36 m s<sup>-1</sup>. Même si la vitesse moyenne se trouve au-delà de 1 m s<sup>-1</sup>, la prépondérance des petites particules influence le mode qui se trouve plutôt autour 0.8 m s<sup>-1</sup>. Ceci implique que les petites particules influencent le diamètre moyen et la vitesse moyenne. Par contre, ces particules contribuent très peu à la masse totale de précipitation, car elles sont très petites.

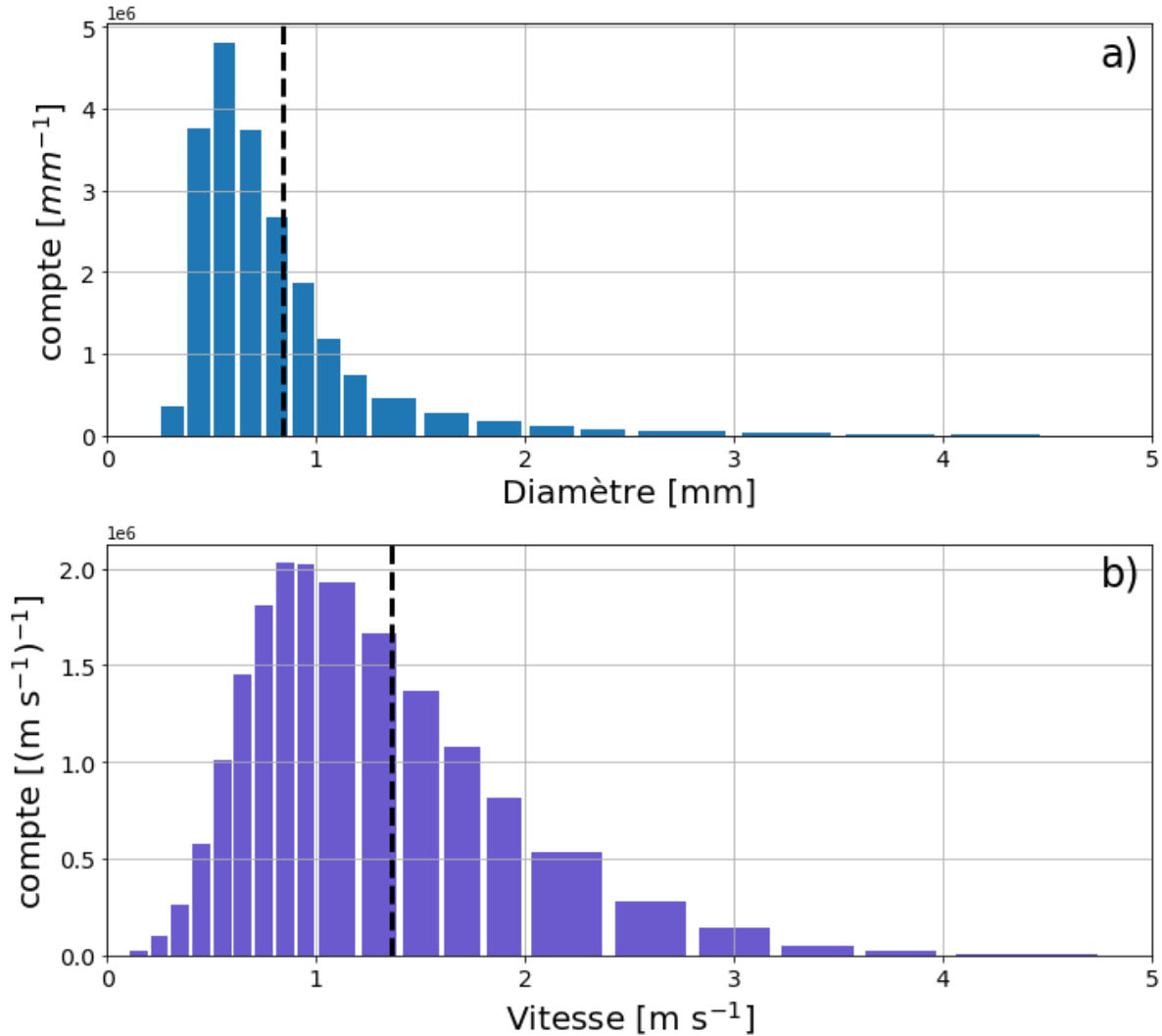


Figure 13. Comptes normalisés enregistrés par le disdromètre laser-optique pour : a) le diamètre [mm] et b) la vitesse des particules. En pointillés sont représentées les moyennes. Valide de 1000 UTC le 6 février 2020 à 0400 UTC le 8 février 2020.

Les Figure 14 représentent les distributions de tailles et de vitesses normalisées par la largeur respective de leur bins pour chaque type de cristaux observés. On remarque des similarités entre les types de cristaux dans les distributions. Par exemple, les dendrites et les plaques suivent une distribution similaire pour les diamètres et les vitesses de chutes. On remarque un pic d'occurrence marqué près de 0.6 mm pour tous les types de cristaux. Néanmoins, des différences sont observables pour des diamètres entre 0.30 et 0.60 mm et des vitesses entre 0.8 m s<sup>-1</sup> et 1.1 m s<sup>-1</sup> où les distinctions sont les plus prononcées. Ces différences sont plus marquées pour les diamètres

que pour les vitesses de chutes. On remarque la présence du pic de fraction d'occurrence des petites particules associées aux grésils. On note que les diamètres moyens de chacun des types de cristaux varient entre 0.68 et 0.81 mm et que les vitesses moyennes varient entre 1.06 et 1.15 m s<sup>-1</sup> (Tableau 7). On remarque que pour les diamètres et les vitesses de chute une très grande variabilité dans la distribution. Les écarts-types pour des diamètres de tous les types de cristaux varient entre 0.29 et 0.43 mm (Tableau 7). Les écarts-types pour les vitesses de tous les types de cristaux varient entre 0.49 et 0.57 m s<sup>-1</sup>.



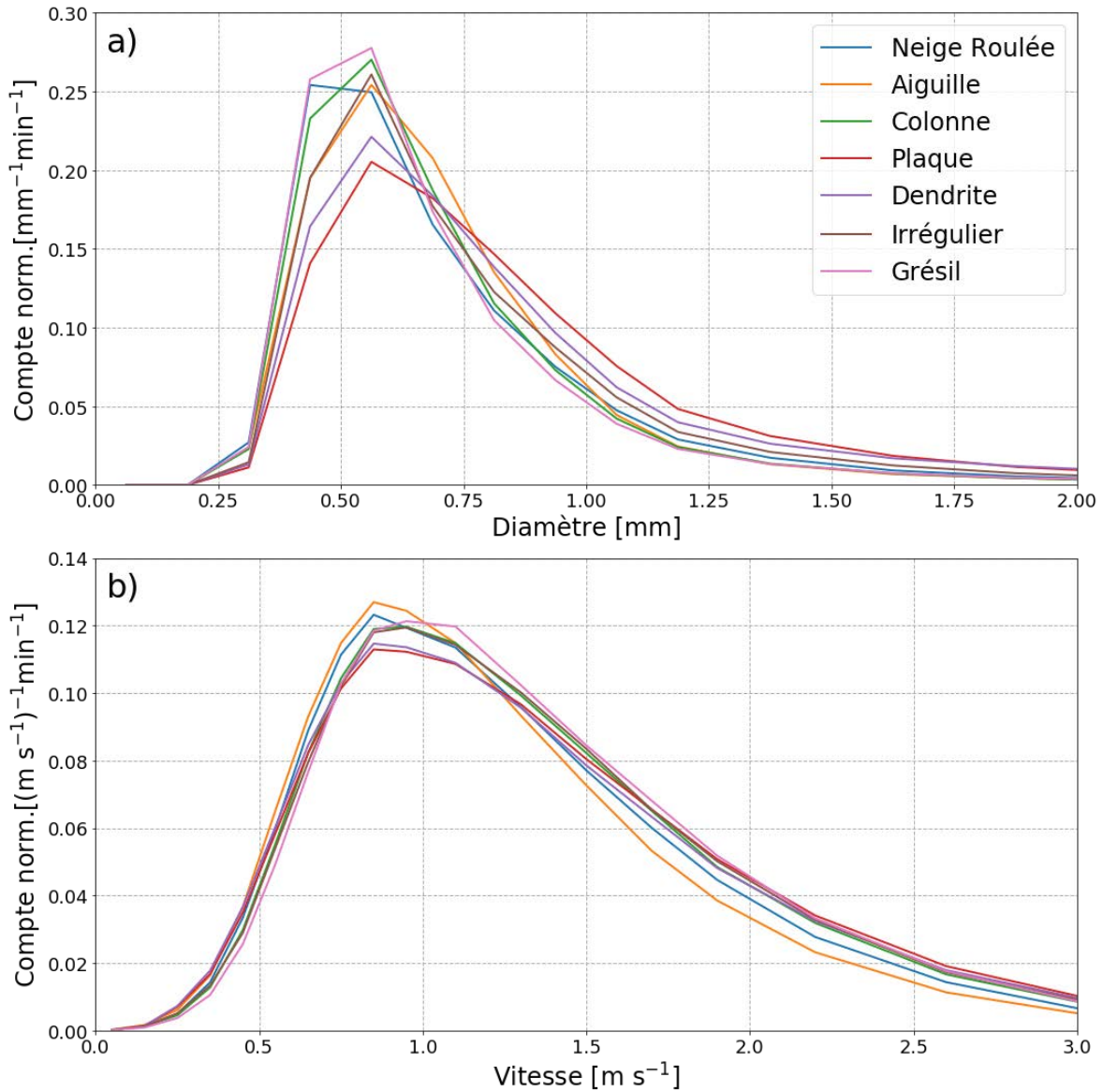


Figure 14. Comptes normalisés du disdromètre laser-optique pour : a) les diamètres et b) les vitesses sont représentées les types de cristaux, en bleu la neige roulée, en orange les aiguilles, en vert les colonnes, en rouge les plaques, en mauve les dendrites, en brun les irréguliers et en rose le grésil.

Tableau 7. Diamètres et vitesses moyennes des différents types de cristaux.

Type de cristal	Diamètre moyen [mm]	$\sigma_D$ [mm]	Vitesse moyenne [m s <sup>-1</sup> ]	$\sigma_v$ [m s <sup>-1</sup> ]
Neige roulée	0.69	0.33	1.09	0.51
Aiguille	0.70	0.30	1.06	0.49
Colonne	0.68	0.29	1.13	0.53
Plaque	0.81	0.39	1.14	0.57
Dendrite	0.80	0.43	1.12	0.56
Irrégulier	0.73	0.34	1.14	0.54
Grésil	0.67	0.31	1.15	0.53

#### 4.2 Spectre de vitesse en fonction du diamètre $v(D)$

Les spectres de vitesses en fonction du diamètre ont été réalisés pour des types de cristaux de glace et comparés aux vitesses de chutes théoriques, lesquelles sont énumérées à la Tableau 5.

La période 7 était marquée par l'occurrence de dendrites non-givrées (Figure 10). On retrouvait également des dendrites fortement givrées entre 1040-1330 UTC qui marquaient la période 2 de l'événement (Figure 10). La Figure 15a montre le spectre de vitesse en fonction du diamètre pour les dendrites qui se trouvaient également en forte concentration pour des diamètres entre 0.3 et 3.5 mm et des vitesses de chutes de 0.25 à 3.75 m s<sup>-1</sup>. La médiane se retrouve nettement au-dessus de toutes les courbes théoriques proposées. Les vents forts à la surface durant cette période ont possiblement introduit non seulement du bruit se traduisant par l'occurrence marquée de petites particules ayant de grandes vitesses, mais également par la surestimation des vitesses de chutes réelles pour les dendrites (Annexe B).

La Figure 15b montre le spectre de vitesse en fonction du diamètre pour toutes les aiguilles de l'événement. On remarque la forte concentration de petites particules en rouge bornée entre 0.25 et 2 mm de diamètre associé à des vitesses entre 0.3 m s<sup>-1</sup> à ~3.75 m s<sup>-1</sup>. En regardant la tendance de la médiane, on ne remarque qu'aucune des courbes théoriques ne satisfait exactement la

distribution pour les aiguilles. Seule la courbe de Barthazy et Schefold (2006) touche au 25<sup>e</sup> percentile entre 2 et 5 mm de diamètre (ligne mauve pointillée).

Pour les colonnes (Figure 15c), comme pour les aiguilles, la courbe médiane ne suit pas exactement les courbes théoriques proposées et se situe entre les colonnes longues (Rasmussen et al. 1999) et la courbe de Vásquez-Martín et al. (2021) de 1 à 2.75 mm de diamètre pour ensuite converger vers la courbe de Vásquez-Martín et al. (2021). Néanmoins la borne inférieure du 25<sup>e</sup> percentile suit bien la tendance des colonnes de Vásquez-Martín et al. (2021). La plupart des colonnes de l'événement étaient des colonnes épaisses et creuses de non-givrées à fortement givrées, ce que décrit la courbe de Vásquez-Martín et al. (2021).

La Figure 15d montre le spectre de vitesse en fonction du diamètre pour les plaques. L'occurrence de plaques et dendrites non-givrées ont été observée à la fin de l'événement et définissait la période 7 (Figure 10). On remarque la forte concentration en rouge de particules entre 0.3 et 2.25 mm de diamètre associé à des vitesses entre 0.25 à 4 m s<sup>-1</sup>. Les mesures dévient davantage de la théorie durant cette période. Cette dernière période était également sujette à de forts vents horizontaux et de la poudrière avait été cataloguée lors des observations manuelles, ceci induit une forte incertitude quant à l'interprétation de ce type de cristal. On remarque aussi que la médiane converge avec la courbe théorique de Barthazy et Schefold (2006) de 0.8 à 1.5 mm de diamètre et diverge par la suite pour se retrouver à des vitesses supérieures à toutes les courbes théoriques proposées. Les vents forts mènent probablement à la surestimation des vitesses de chutes des cristaux par le disdromètre. Malgré tout, les 25<sup>e</sup> et 75<sup>e</sup> percentiles incorporent la courbe de Barthazy et Schefold (2006) de 0.8 à 3.8 mm.

La Figure 15e montre le spectre de vitesse en fonction du diamètre pour la neige roulée mesurée et théorique. En dessous de 1 mm de diamètre, la forte concentration de particule rend l'analyse de la médiane difficile par rapport aux courbes théoriques. De plus, les courbes théoriques se croisent à cet endroit, ce qui rend la discrimination et l'assignation à une courbe précise difficile. Néanmoins, entre 1 et 2.5 mm de diamètre, la courbe médiane suit de près la courbe de Heymsfield et Kajikawa (1987). On remarque également que les 25<sup>e</sup> et 75<sup>e</sup> percentiles incorporent de 1 à 3 mm de diamètre dans la courbe de Heymsfield et Kajikawa (1987) ce qui renforce la confiance de la

représentation de cette courbe pour cette gamme de diamètres. À des diamètres supérieurs à 3 mm, les vitesses de chutes tendent à devenir asymptotiques à environ  $1.5 \text{ m s}^{-1}$ .

La Figure 15f montre le spectre en fonction du diamètre pour le grésil. Comme pour les spectres précédents, les 5<sup>e</sup>, 25<sup>e</sup>, 75<sup>e</sup> et 95<sup>e</sup> percentiles sont représentés en pointillés et la courbe théorique de la pluie (Atlas et al. 1977) est représentée en bleu. On ne retrouve aucune courbe théorique pour le grésil dans la littérature. Néanmoins, le grésil est caractérisé par une haute densité et des vitesses de chutes plus élevées que les autres types de cristaux. Pour ces raisons, une comparaison avec la courbe théorique de la pluie est proposée. Le grésil a été observé durant la période 3 de façon prépondérante avec des traces de dendrites et de neige roulée puis lors de la période 5 elle couvrait pratiquement 100 % de la plaquette de collection. Les traces de différents types de cristaux de glace semblent avoir ajouté du bruit dans les mesures de vitesse de chute particulièrement lors de la période 3 de l'événement.

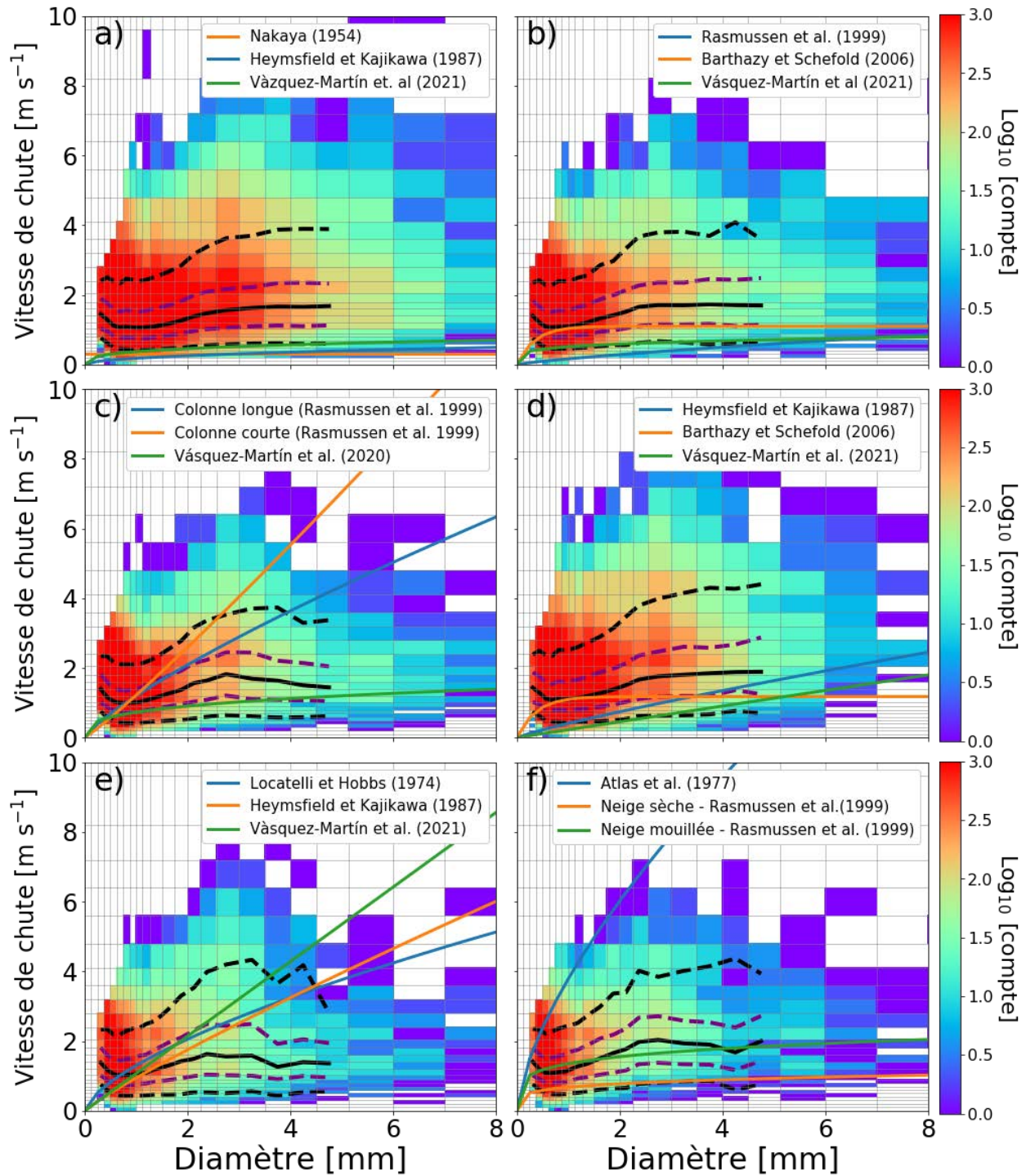


Figure 15. Spectre de vitesse en fonction du diamètre pour : a) les dendrites, b) les aiguilles, c) les colonnes, d) les plaques, e) la neige roulée et f) le grésil. Les courbes théoriques de vitesse en fonction du diamètre respectif sont représentées en bleu, orange et vert. La courbe noire pleine représente la médiane de chacune des distributions. Les courbes pointillées noires représentent les 5<sup>e</sup> et 95<sup>e</sup> percentiles et les courbes pointillées mauves les 25<sup>e</sup> et 75<sup>e</sup> percentiles.



## CHAPITRE 5

### ANALYSE DU GIVRAGE SUR LA VITESSE DE CHUTE

#### 5.1 Évolution et quantification du givrage durant l'événement

L'évolution temporelle du givrage de 1000 UTC le 6 février 2020 à 0400 UTC le 8 février 2020 est illustrée sur la Figure 16. L'événement est scindé en trois phases de givrage. La première phase s'est déroulée de 1000 UTC à 1600 UTC le 6 février 2020 où le givrage moyen des particules durant la période est environ 3 (densément givré). La deuxième phase de 1600 UTC le 6 février 2020 à environ 1400 UTC le 7 février 2020 était marquée par un givrage moyen des particules modérées (stage 2). La troisième phase de givrage s'est déroulée de 1400 UTC le 7 février 2020 à 0400 UTC le 8 février 2020 et était caractérisée par un givrage nul (stage 0).

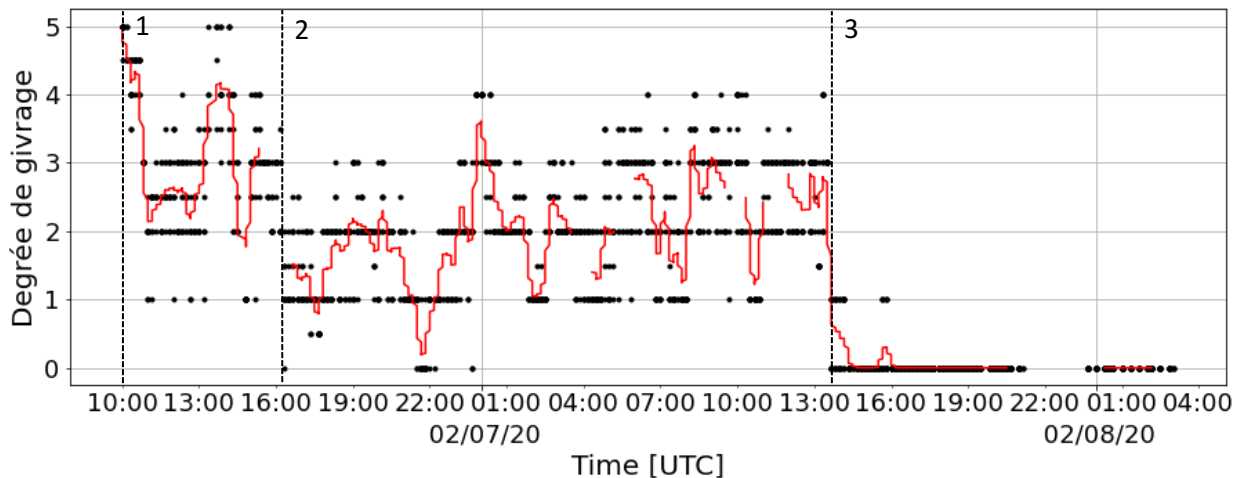


Figure 16. Évolution du givrage en fonction du temps réalisée avec les observations manuelles. En noir le degré de givrage moyen suivant la méthode d'analyse de Mosimann et al. (1994) et en rouge un filtre gaussien de 6° du givrage. Valide de 1000 UTC 2020-02-06 à 0400 UTC 2020-02-08.

On remarque la présence de maxima qui sont associés à la présence pondérée de certains types de cristaux de glace. La Figure 17 montre l'évolution du givrage de chacun des types de cristaux définis à la Tableau 3. La première portion de la première phase de givrage (Figure 16) a été marquée par la présence de neige roulée givrée complètement (stage 5) et des dendrites densément

givrées (stage 4) qui se retrouvaient parfois non-givrées (stage 0) entre 1000-1300 UTC le 6 février 2020. La deuxième partie de la phase 1 (Figure 10), soit d'environ 1300-1600 UTC le 6 février 2020, a été marqué par principalement de la neige roulée et du grésil allant de non-givré à modérément givré (stage 2, Figure 16). La deuxième phase de givrage ayant un givrage moyen modéré était marquée par principalement des aiguilles et de colonnes allant de non-givrées à densément givrées (stage 3). La troisième phase était caractérisée par aucun givrage et la présence de dendrite, plaques ainsi que de dendrites et plaques radiatives.



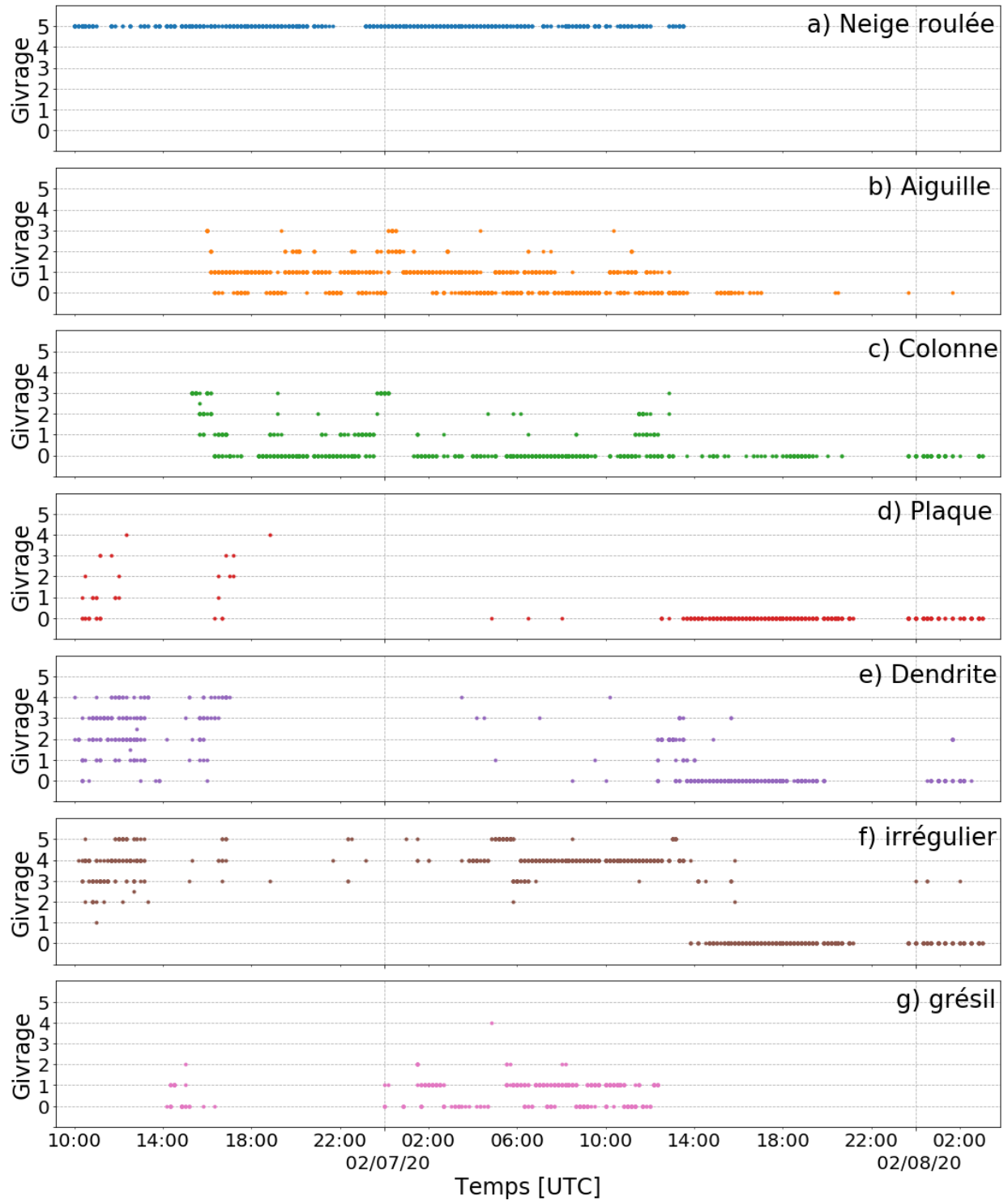


Figure 17. Évolution du givrage pour chacun des types cristaux réalisée à l'aide des observations manuelles pour : a) la neige roulée, b) les aiguilles, c) les colonnes, d) les plaques, e) les dendrites, f) les irréguliers et g) le grésil. Valide de 1000 UTC le 6 février 2020 à 0400 UTC le 8 février 2020.

La Figure 18 montre la fraction d'occurrence de chacun des types de cristaux de glace en fonction de trois régimes de givrage. Le premier régime de givrage englobe toutes les particules de non-givrées à légèrement givrées. Le deuxième régime incorpore toutes les particules de légèrement à densément givrées et le troisième régime prend en compte toutes les particules de densément givrées à la neige roulée.

La plupart des particules givrées reconnaissables étaient des aiguilles et des colonnes. Elles étaient associées à la plus longue période de l'évènement (Figure 10b, Période 4) et ce pour les deux premiers régimes de givrage (Figure 18a,b). L'occurrence de colonnes était dominante avec 29 % d'occurrence régime 1 (Figure 19a) en comparaison avec 11 % pour le régime 2 (Figure 19b). Inversement pour les aiguilles qui étaient de façon générale plus souvent givrées que les colonnes avec 19 % et 50 % d'occurrences respectives pour les régimes 1 et 2 (Figure 19c,d). Les types colonnes et aiguilles représentent de façon combinées 37.3 % de l'occurrence de tous les types de cristaux sur toute la longueur de l'évènement (Figure 11).

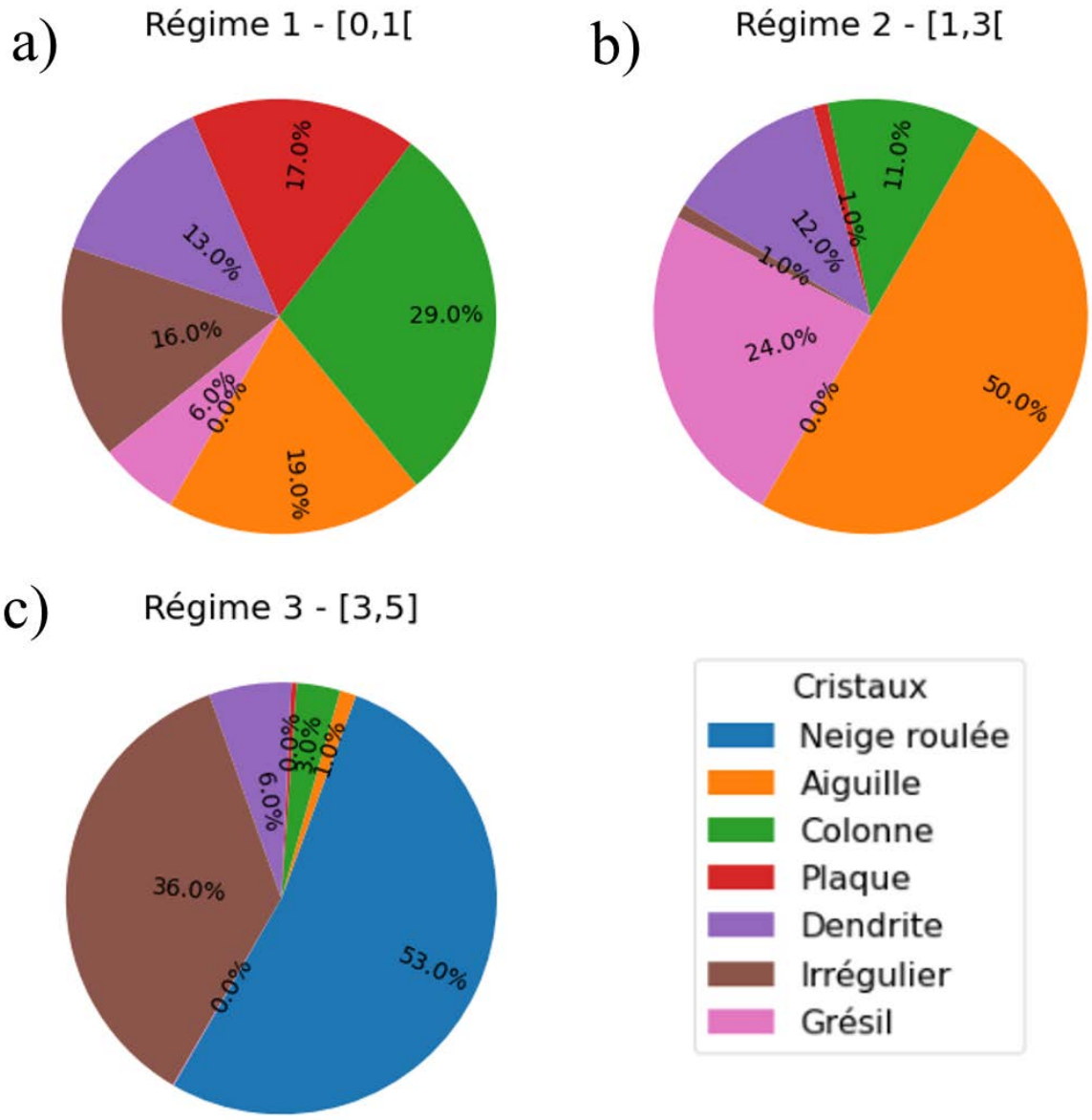


Figure 18. Fraction d'occurrence des types de cristaux de glace réalisés avec les observations manuelles pour trois régimes de givrage : a) régime 1 est un taux de givrage léger, b) régime 2 est un taux de givrage modéré et c) régime 3 est densément givré.

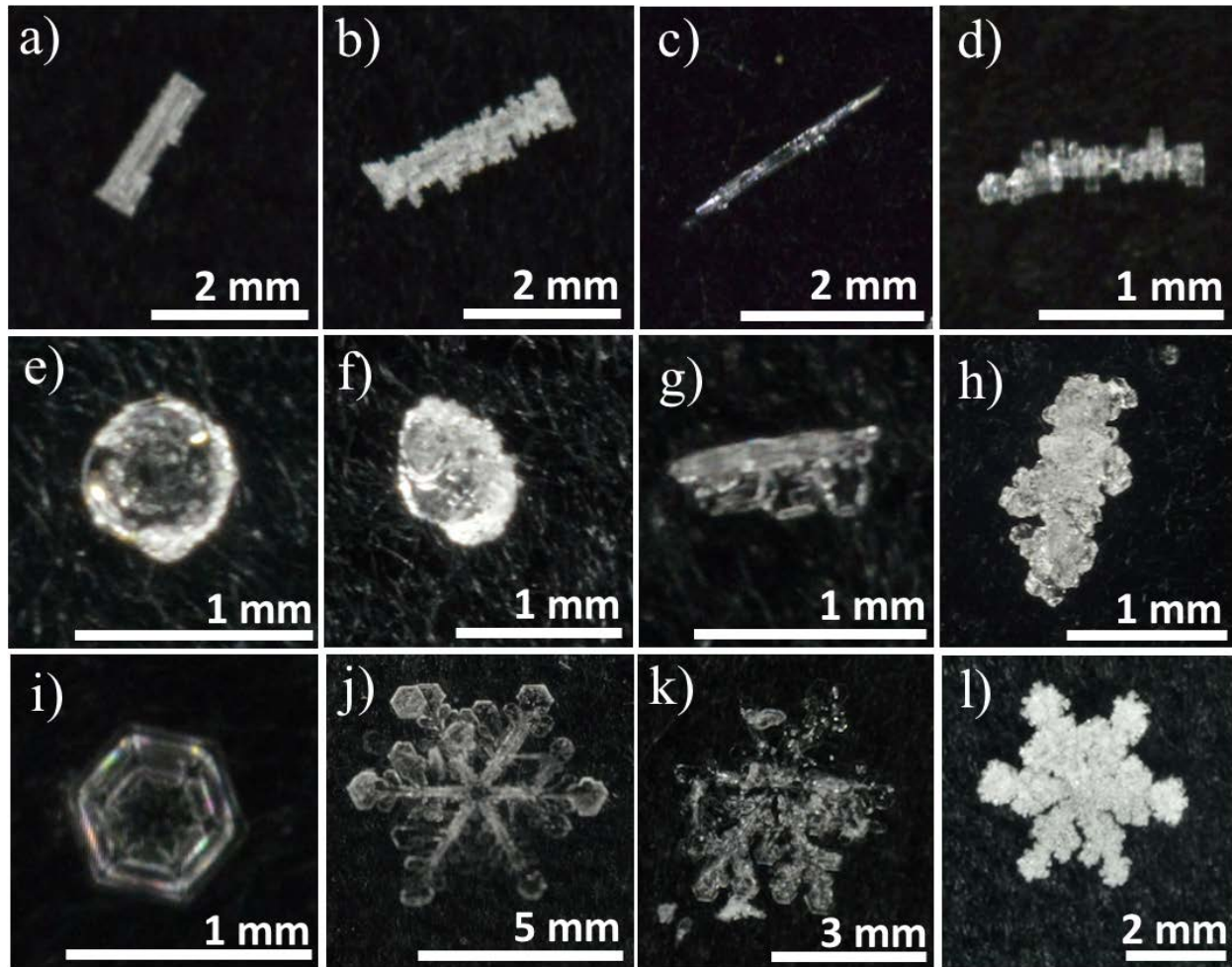


Figure 19. Exemple des types de cristaux associées aux fractions d'occurrences des 3 régimes de givrage : a) Colonne du régime 1, b) colonne du régime 2, c) aiguille du régime 1, d) aiguille du régime 2, e) grésil du régime 1, f) grésil du régime 2, g) irrégulier du régime 1, h) irrégulier du régime 3, i) plaque du régime 1, j) dendrite du régime 1, k) dendrite du régime 2 et l) dendrite du régime 3.

Le degré de givrage des particules de grésils se trouvait entre non-givrées et modérément givrées (Figure 19e,f), à l'exception de quelques particules fortement givrées (Figure 17). Les particules de grésils se trouvaient à 6 % dans le régime 1 et à 24 % d'occurrence dans le régime 2. Les particules irrégulières étaient de façon générale non-givrées (régime 1) ou fortement givrées (régime 3), soit de 16 % et 36 % d'occurrence, respectivement (Figure 18). Les particules irrégulières non-givrées étaient possiblement des fragments de particules brisées, soient des morceaux de branches dendritiques ou les extensions de plaques de particules stellaires (Figure

19g). Les particules irrégulières fortement givrées (Figure 19h) étaient possiblement des morceaux fracturés de neige roulées au début de l'événement associé à de petites particules asymétriques givrées au stage 5. D'autres particules irrégulières de grandes tailles givrées au stage 5 ont été observées à l'aide des macrophotographies au début de l'événement. Elles étaient possiblement associées à de possibles agrégats de neige roulée. Les plaques étaient non givrées et associées à la période 7 de l'événement (Figure 19i). Elles avaient une fraction d'occurrence de 17% pour le régime 1 de givrage (Figure 18). Les dendrites occupaient les régimes 1 à 3 avec une occurrence de 13 %, 12 % et de 6 % (Figure 18, Figure 19j,k,l).

## 5.2 Corrélation entre le givrage et la vitesse de chute des particules

L'influence du givrage sur la vitesse de chute des particules a été étudiée par diverses campagnes de terrain (Ono 1969 ; Barthazy et Schefold 2006). Une analyse de la corrélation entre la vitesse de chute moyenne des particules et le degré de givrage moyen observé suite à l'analyse des macrophotographies a été effectuée. La vitesse moyenne de chute a été calculée à l'aide des données du disdromètre laser-optique en utilisant la moyenne pondérée de tous les bins de diamètre de l'instrument à toutes les 10 minutes. Une valeur de givrage a également été moyennée toutes les 10 minutes suite à l'analyse de macrophotographies.

Le Tableau 8 résume la corrélation entre la vitesse de chute des particules et le givrage pour chacune des périodes. En prenant l'ensemble de l'événement, on ne remarque aucune corrélation, mais on remarque une variation de la corrélation avec les périodes de précipitations. Ces valeurs varient entre -0.28 à + 0.53 (Tableau 8).

Aucune corrélation n'a pu être calculée pour les périodes 1 et 3 de l'événement. La période 1 n'avait pas assez de membres pour faire une corrélation avec un poids statistique rigoureux. Pour la période 3, un problème avec le disdromètre laser-optique a rendu impossible le calcul des vitesses de chutes et, ainsi, la corrélation. La période 2 associée à des dendrites fortement givrées et de la neige roulée relève une bonne corrélation entre l'accrétion de gouttelettes et la vitesse terminale (0.53). La période 4 associée à la présence de colonnes et d'aiguilles variant de non-givrées à modérément givrée a obtenu une corrélation positive de 0.48. Des résultats similaires (Barthazy et Schefold 2006) ont montré que les cristaux de types aiguilles et plaques semblent plus

sensibles au givrage. La période 5 est associée à une corrélation négative de -0.28 et la présence de grésil principalement non-givrée ou légèrement givrée. Les particules de grésil étant des sphères de glace denses, elles sont associées à des vitesses de chute plus élevées et se rapprochant de celle de la pluie. Les effets du givrage et la vitesse de chute intrinsèque des particules de grésil semblent se contrebalancer. L'effet du givrage est donc difficilement mesurable pour cette période de précipitations. Il ne semble pas y avoir d'effet du givrage sur la vitesse de chute lors de la 6<sup>e</sup> période avec une corrélation nulle. La période 6 était marquée par un givrage modéré et l'occurrence de différents types de cristaux de glace, ce qui est difficile de généraliser. C'est également à ce moment où une transition de régime de givrage est observable, soit de la période 2 à la période 3 (Figure 16). Finalement, La période 7 de l'événement était associée à une faible corrélation entre les vitesses de chutes et le givrage (0.15) où des plaques et des dendrites non-givrées ont été observées au sol. La vitesse de chute ne semble pas être affectée par le taux de givrage, mais plutôt les propriétés de tailles et de géométries. Le vent était aussi plus de 4 m s<sup>-1</sup> à ce moment, ce qui peut influencer la vitesse de chute.

Tableau 8. Corrélation entre le givrage et les vitesses terminales moyennes mesurées par le disdromètre laser-optique pour les 7 périodes de l'événement illustré à la Figure 10.

Période	Corrélation
1	-
2	0.53
3	-
4	0.48
5	- 0.28
6	0
7	0.15

Lorsque la corrélation est réalisée sur l'ensemble de l'événement, on note tout de même que certaines périodes de l'événement et de types de cristaux de glace semblent plus sensibles au givrage. Notamment les périodes 2,4 et 7 qui ont des corrélations positives. La période 4 a été choisie à des fins d'analyse plus pointue sur l'impact du givrage sur la vitesse de chute des

particules. Cette période était la plus longue, soit 16 heures de précipitations, et une corrélation modérée de 0.48 est associée à cette période. Les effets de surface étaient également plus modérés durant cette période, le vent horizontal oscillait autour de  $4 \text{ m s}^{-1}$  (Figure 28).

La Figure 20 montre le lien entre le type de cristal de glace, la vitesse de chute moyenne et le degré de givrage entre 1500 UTC le 6 février 2020 et 0700 UTC le 7 février 2020. On remarque la prépondérance de l'occurrence des aiguilles et des colonnes lors de la période 4 ainsi que des traces de neige roulée et de grésil. On constate également que la vitesse de chute moyenne et le degré de givrage moyen semblent suivre une tendance similaire. À 1730 UTC et 2130 UTC le 6 février 2020, à 0230 UTC et 0500 UTC le 7 février 2020, on remarque au même moment un minimum dans la vitesse de chute et le givrage. De façon similaire, on remarque que les maximums sont également en phase. On note une transition du givrage nul à léger vers 2200 UTC le 6 février à fortement givré le 0000 UTC le 7 février. On remarque aussi que la vitesse moyenne des particules est passée d'environ  $1.3 \text{ m s}^{-1}$  à environ  $1.7 \text{ m s}^{-1}$  entre 2200 UTC le 6 février et 0000 UTC le 7 février. Cette transition de vitesse de chute se produit lorsque le degré de givrage augmente et que le type de particule change de colonnes à la neige roulée qui est givrée au stage 5.

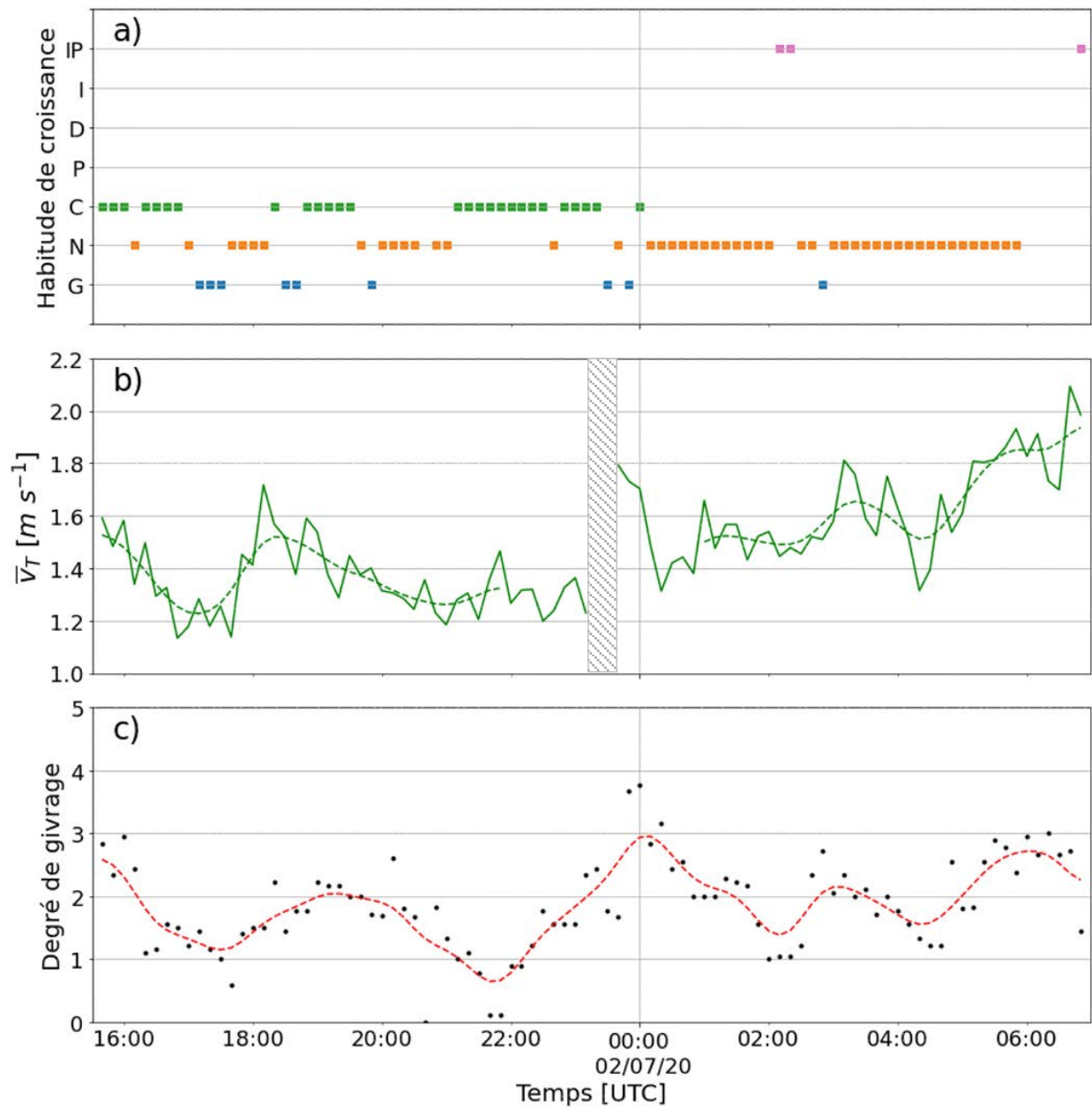


Figure 20. Évolution temporelle de 1500 UTC 2020-02-06 à 0700 UTC 2020-02-07 : a) des types de cristaux, b) de la vitesse terminale moyenne mesurée par le disdromètre laser-optique (ligne pleine) ainsi qu'un filtre Gaussien (ligne pointillé) et c) le degré de givrage. La région hachurée en b) représente un manque de données.



### 5.3 Analyse de l'influence du givrage sur la vitesse de chute

Pour donner suite à l'analyse de l'évolution temporelle des types de cristaux et du givrage associé à chacune d'elles dans la section précédente, un intérêt est porté vers la capacité du disdromètre laser-optique à mesurer l'impact du givrage. Les spectres de vitesses en fonction du diamètre ont été réalisés pour chacune des types de cristaux et sont présentés dans cette sous-section.

La Figure 21 montre les spectres de vitesses en fonction du diamètre pour les colonnes. On remarque que tous les régimes de givrage ont un maximum d'occurrences de petites particules qui ont des vitesses relativement élevées proportionnellement à leur taille. En effet, comme le montre la médiane, un maximum d'occurrence de particules d'environ 0.3 mm et de vitesse de chute entre  $1.5 \text{ m s}^{-1}$  et  $3 \text{ m s}^{-1}$  est associé à une forte densité de particules. Cette forte occurrence de petites particules est un problème connu de l'instrument qui rend l'interprétation des données difficile (Yuter et al. 2006; Gualco et al. 2021). On doit ainsi focaliser notre analyse sur les particules plus grosses. Pour les particules de diamètres entre 1 mm et 4 mm, on note que l'augmentation du givrage semble avoir comme effet d'augmenter la pente de vitesse en fonction du diamètre médian. Par exemple, pour une particule de diamètre de 1 mm les vitesses de chute pour les 3 régimes de givrage sont  $1 \text{ m s}^{-1}$ ,  $1.2 \text{ m s}^{-1}$  et  $1.2 \text{ m s}^{-1}$ . On remarque une augmentation de 20% de la vitesse terminale des particules modérément et fortement givrées par rapport aux particules non-givrées. L'augmentation de la vitesse de chute est plus significative pour un diamètre de 2.5 mm. Nous obtenons,  $1.4 \text{ m s}^{-1}$ ,  $1.6 \text{ m s}^{-1}$  et  $1.8 \text{ m s}^{-1}$  pour les 3 régimes de givrage, respectivement. On note une augmentation d'environ  $0.2 \text{ m s}^{-1}$  des particules du régime 2 par rapport au régime 1 et de  $0.4 \text{ m s}^{-1}$  d'augmentation de la vitesse de chute des particules du régime 3 par rapport au régime 1. En regardant les trois régimes de givrage, on remarque que leur courbe médiane se trouve entre la courbe théorique de Vásquez-Martín et al. (2021) et se rapproche de la courbe associée aux colonnes longues (Rasmussen et al. 1999). On note également en regardant les 25<sup>e</sup> et 75<sup>e</sup> percentiles que les dimensions de particules d'environ 1 et 4 mm, plus ou moins 50 % des données se trouvent entre les deux courbes théoriques mentionnées. Cette distribution est probablement représentative de l'ensemble des particules mesurées.

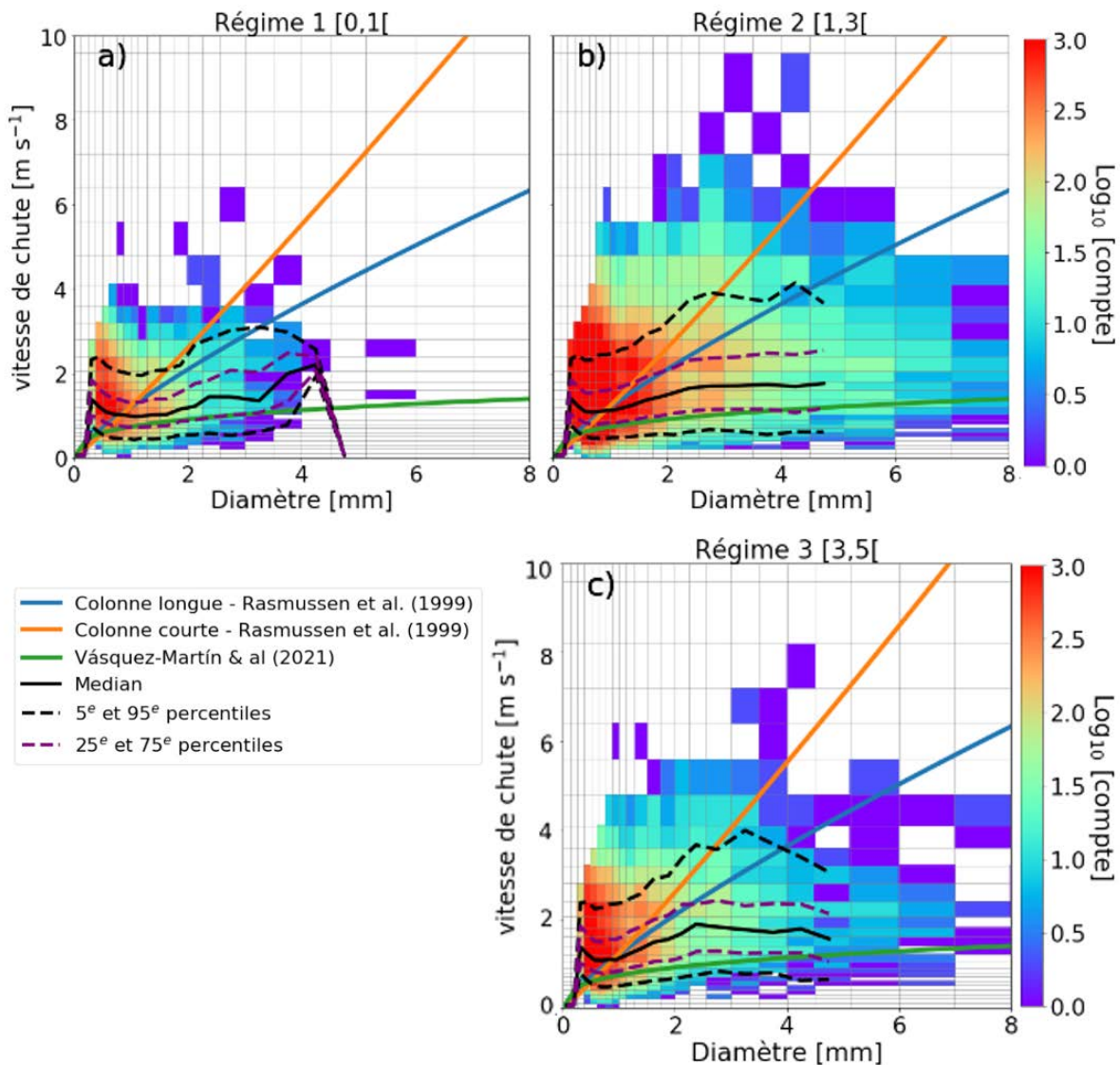


Figure 21. Spectre de vitesse en fonction du diamètre pour les colonnes en trois régimes de givrage : a) de pas givré (0) à légèrement givré (1), b) de légèrement givré (1) à densément givré (3) et c) de densément givré (3) à neige roulée (5). Les courbes pleines colorées représentent les courbes théoriques de vitesse en fonction du diamètre des colonnes longues (bleu) tirée de Rasmussen et al. (1999), les colonnes courtes (orange) tirée de Rasmussen et al. (1999) et tous les types de colonnes (vert) tirées de Vásquez-Martín & al (2021). La courbe noire pleine représente la médiane de chacune des distributions. Les courbes pointillées noires représentent les 5<sup>e</sup> et 95<sup>e</sup> percentiles et les courbes pointillées mauves les 25<sup>e</sup> et 75<sup>e</sup> percentiles.

La Figure 22 montre les spectres de vitesses en fonction du diamètre pour trois régimes de givrages des aiguilles. En regardant la médiane du premier régime de givrage (Figure 22a), on remarque que la distribution suit bien la courbe théorique de Barthazy et Schefold (2006) pour des diamètres entre environ 0.8 et 4.5 mm. On constate que pour le 2<sup>e</sup> régime de givrage, la médiane sous-estime les vitesses entre 0.8 et 2 mm par rapport à Barthazy et Schefold (2006), mais suit bien la courbe entre 2 et 4 mm (Figure 22b). Tandis que le 3<sup>e</sup> régime de givrage n'est pas bien représenté par aucune courbe théorique (Figure 22c). Pour les diamètres d'environ 1 mm, les trois vitesses associées à chacun des régimes de givrages sont  $1.0 \text{ m s}^{-1}$ ,  $1.0 \text{ m s}^{-1}$  et  $1.0 \text{ m s}^{-1}$ . Similairement aux colonnes (Figure 21), où l'on notait peu d'influence du givrage sur l'augmentation de la pour des diamètres de moins de 1 mm. On ne note aucun impact du givrage dans le cas des aiguilles pour cette gamme de rayons. Pour les particules de 2 mm, les trois vitesses de chutes associées à la médiane pour chacun des régimes de givrages sont  $1.0 \text{ m s}^{-1}$ ,  $1.5 \text{ m s}^{-1}$  et  $1.4 \text{ m s}^{-1}$ . On constate une augmentation de la vitesse de chute d'environ  $0.5 \text{ m s}^{-1}$  et  $0.4 \text{ m s}^{-1}$  du deuxième et troisième régime, respectivement, par rapport au premier régime de givrage. En comparant le spectre en fonction du diamètre et du givrage pour les aiguilles, on remarque que la contribution du 2<sup>e</sup> régime de givrage est prépondérante sur la signature globale des aiguilles.

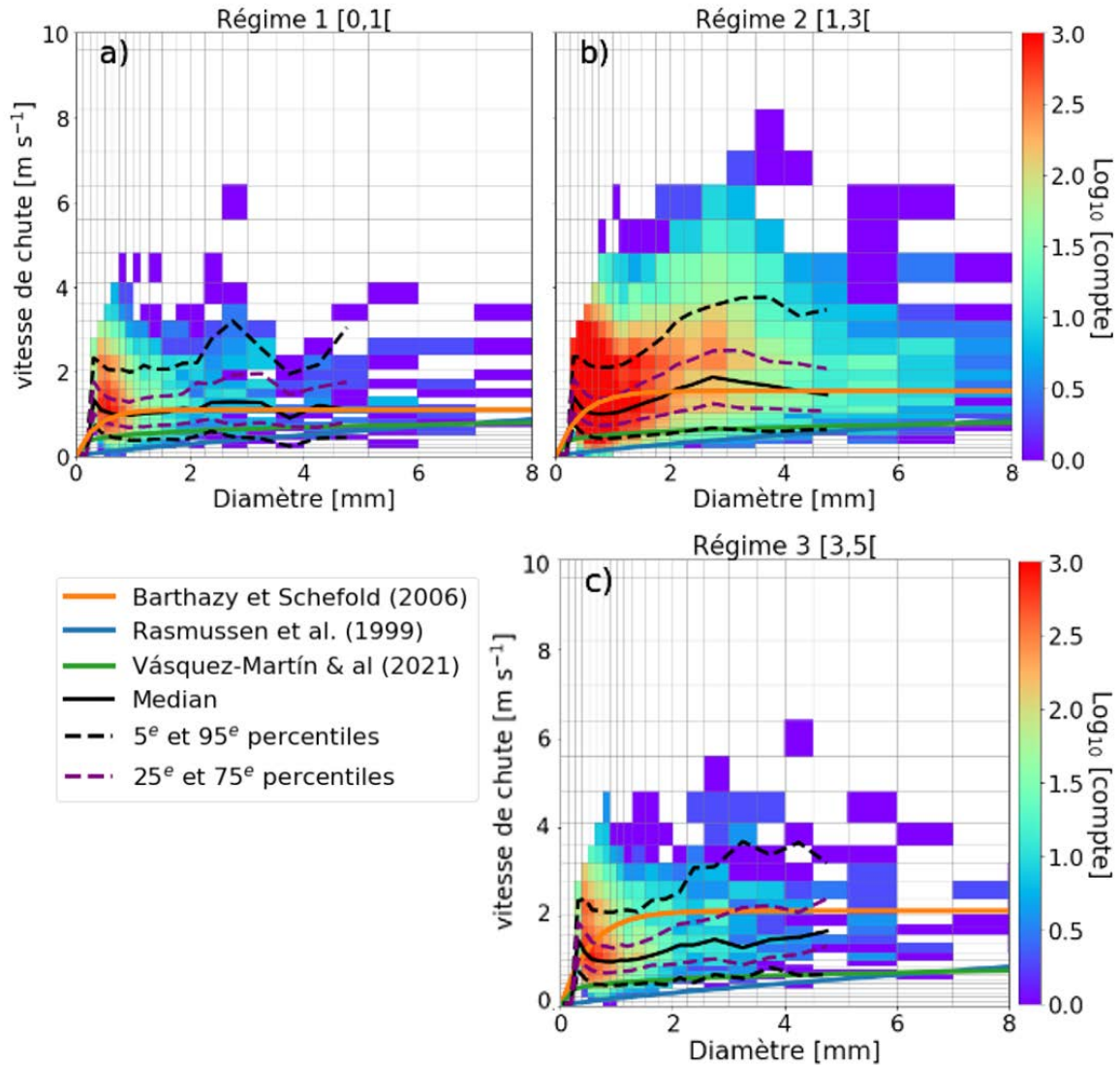


Figure 22. Spectre de vitesse en fonction du diamètre pour les aiguilles en trois régimes de givrage : a) de pas givré (0) à légèrement givré (1), b) de légèrement givré (1) à densément givré (3) et c) de densément givré (3) à neige roulée (5). La courbe orange pleine représente la courbe théorique des aiguilles tirée de Barthazy et Schefold (2006), la courbe bleue est tirée de Rasmussen et al. (1999) et la courbe verte pleine est tirée de Vásquez-Martín & al (2021). La courbe noire pleine représente la médiane de chacune des distributions. Les courbes pointillées noires représentent les 5<sup>e</sup> et 95<sup>e</sup> percentiles et les courbes pointillées mauves les 25<sup>e</sup> et 75<sup>e</sup> percentiles.

Les Figure 23 montrent les spectres de vitesses en fonction du diamètre des dendrites pour trois régimes de givrages distincts. Les particules associées au premier régime de givrage ne concordent avec aucune des courbes théoriques associées aux dendrites non-givrées (Figure 23a). Ces dendrites étaient associées à la période 7 de l'événement (Figure 10b) où l'occurrence de dendrites et de plaques non-givrées étaient prépondérante avec des vents de surface élevés. Une analyse de l'impact du vent horizontale est proposée à l'Annexe B. En effet, la courbe médiane des vitesses en fonction du diamètre est supérieure aux trois courbes théoriques sur l'ensemble de la distribution. Pour une dimension de 1 mm, les vitesses de chutes associées à chacun des régimes de givrage sont  $1.0 \text{ m s}^{-1}$ ,  $1.0 \text{ m s}^{-1}$  et  $1.1 \text{ m s}^{-1}$ , respectivement on note une faible augmentation de 10% des vitesses de chute entre le régime 3 et une surestimation de la vitesse terminale pour le premier régime de givrage. En évaluant pour un diamètre plus élevé, soit de 2.5 mm, nous avons que les vitesses de chute pour chaque régime sont, respectivement,  $1.6 \text{ m s}^{-1}$ ,  $1.2 \text{ m s}^{-1}$  et  $1.4 \text{ m s}^{-1}$ . On une surestimation des vitesses de chute par la médiane pour le régime 1. On note une augmentation de la vitesse de chute de  $0.2 \text{ m s}^{-1}$  du régime 3 par rapport au régime 2. L'étude de Barthazy et Schefold (2006) scindait de façon similaire les particules en 3 régimes de givrages distincts et ont proposé 2 courbes pour les dendrites, soit une courbe modérément givrée et densément givrée. Les régimes 2 et 3 sont bien représentés par les courbes théoriques pour les dendrites proposées par Barthazy et Schefold (2006) qui tiennent en compte le taux de givrage contrairement aux autres courbes théoriques de Nakaya (1954), Rasmussen et al. (1999) et Vásquez-Martín et al (2020) qui ne tiennent pas compte du givrage.

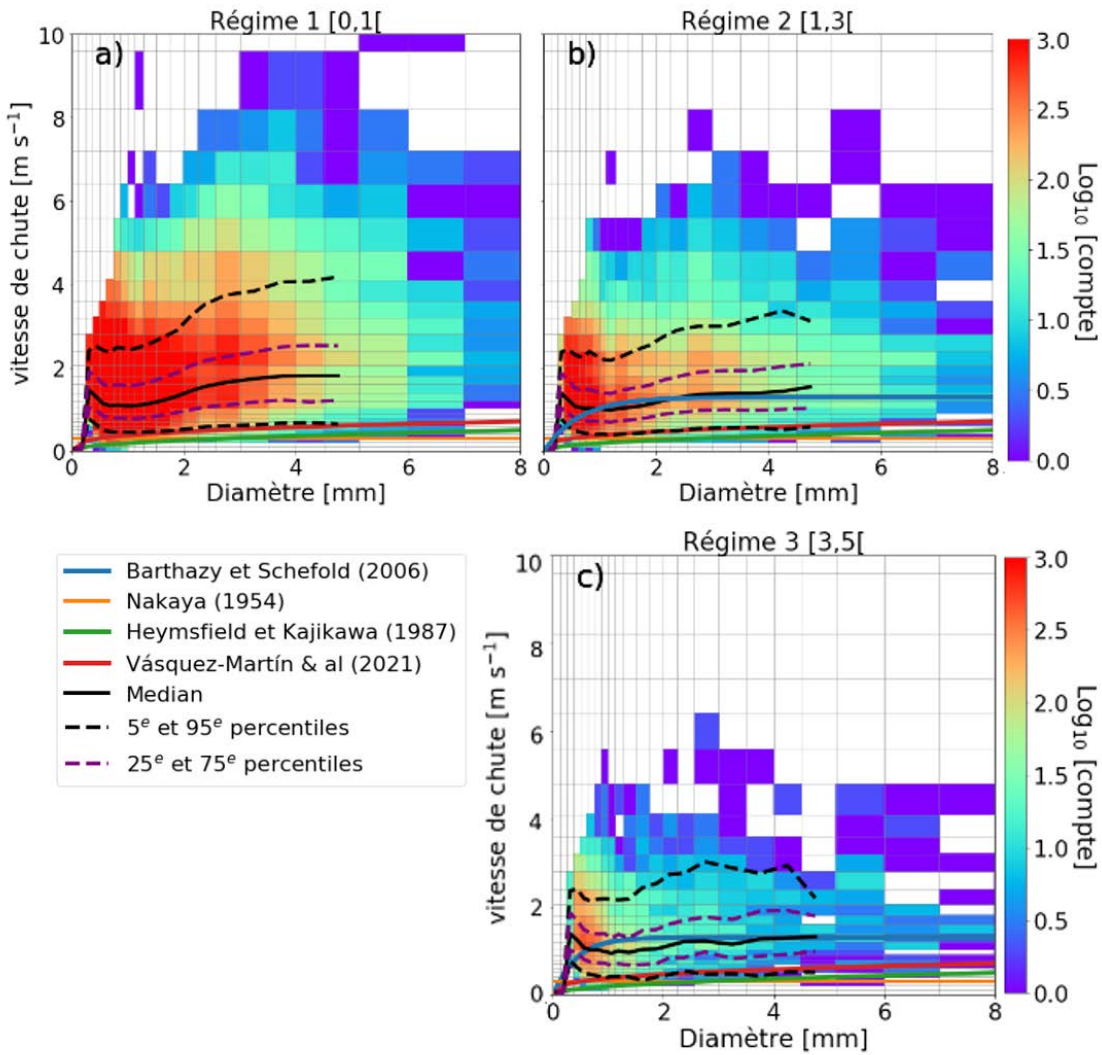


Figure 23. Spectre de vitesse en fonction du diamètre pour les dendrites en trois régimes de givrage : a) de pas givré (0) à légèrement givré (1), b) de légèrement givré (1) à densément givré (3) et c) de densément givré (3) à neige roulée (5). La courbe orange pleine représente la courbe théorique des aiguilles tirée de Barthazy et Schefold (2006), la courbe verte est tirée de Rasmussen et al. (1999) et la courbe rouge pleine est tirée de Vásquez-Martín & al (2021). La courbe noire pleine représente la médiane de chacune des distributions. Les courbes pointillées noires représentent les 5<sup>e</sup> et 95<sup>e</sup> percentiles et les courbes pointillées mauves les 25<sup>e</sup> et 75<sup>e</sup> percentiles.

Le disdromètre laser-optique semble capturer la signature du givrage pour plusieurs types de cristaux, dont les colonnes, les aiguilles et les dendrites. Dans le cadre de cette section, les autres types de cristaux et de précipitations tels que les plaques, le grésil et la neige roulée n'ont pas été

analysés, du fait qu'ils appartenaient respectivement à un seul des trois régimes de givrage et aucune comparaison entre les différents régimes n'était possible. De plus, on note une forte concentration de particules ayant des diamètres inférieurs à 1 mm rendant la corrélation avec les courbes théoriques associées à chacun des types de cristaux ambiguës. De plus, les courbes théoriques ont tendance à se croiser pour de faibles diamètres ( $\sim 0.3$  mm) embrouillant ainsi la signature du givrage, et ce pour tous les types de cristaux. On observe une influence sur l'inclinaison de la pente de la médiane relativement au changement du taux de givrage. En effet, la pente médiane semble augmenter avec l'augmentation du givrage.

Des courbes plus générales comme la neige sèche et la neige mouillée ont été utilisées pour décrire l'ensemble des types de cristaux de façon simultanées (Figure 24). La neige sèche a un taux de givrage nul ou faible (stages de givrage de 0 à 2) et la neige mouillée et regelée a un taux de givrage plus élevé (stages de givrage de 3 à 5). La vitesse de chute de la neige sèche est sous-estimée par le disdromètre laser-optique en comparaison avec l'équation théorique proposée par Rasmussen et al. (1999). En retirant les dendrites et les plaques non-givrées de la distribution, la courbe médiane tend à se rapprocher de la courbe théorique de la neige sèche (Annexe C). Par contre, la mesure de neige mouillée ou givrée est comparable à la vitesse en fonction du diamètre théorique de Rasmussen et al. (1999). L'impact du vent à la surface semble avoir un impact sur l'interprétation de la signature du givrage comme explicité à l'Annexe B. Par exemple, une surestimation de la vitesse des plaques et des dendrites à la période 7 de l'événement (Figure 10b) est visible pour le régime 1 (Figure 24a).

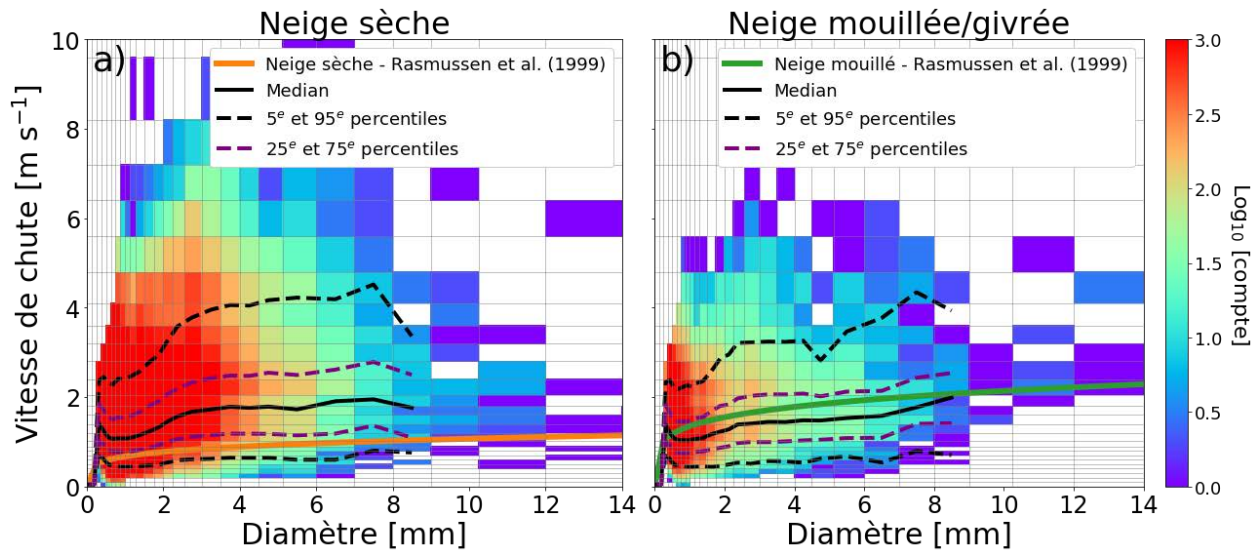


Figure 24. Spectres de vitesses en fonction du diamètre pour deux régimes de givrage : a) régime 1 incorporant les particules du stage 0 au stage 2 de givrage et b) le régime 2 de givrage incorporant les particules du stage 3 au stage 5. Les courbes de la neige sèche (ligne pleine orange) et de la neige mouillée (ligne pleine verte) sont représentées en a) et en b), respectivement tirées de Rasmussen et al. (1999). La courbe noire pleine représente la médiane de chacune des distributions. Les courbes pointillées noires représentent les 5<sup>e</sup> et 95<sup>e</sup> percentiles et les courbes pointillées mauves les 25<sup>e</sup> et 75<sup>e</sup> percentiles.

Finalement, le disdromètre laser-optique semble être apte à mesurer la signature du givrage des particules pour différents régimes de givrage d'une gamme de diamètres allant d'environ 1 à 4 mm. La signature du givrage est visible avec l'inclinaison de la médiane. En dessous de 1 mm, les courbes théoriques se croisent et la discrimination d'un type précis n'est pas possible. En ayant utilisé des courbes plus générales de la neige sèche et de la neige mouillée, on remarque que la neige mouillée est bien représentée.





## CHAPITRE 6

### DISCUSSION ET CONCLUSION

#### 6.1 Discussion

L'événement météorologique s'étant déroulé du 6 au 8 février 2020 a engendré près de 35 cm d'accumulation de neige dans certains arrondissements de Montréal et ses environs. Le Geonor situé sur le toit du PK-UQAM (75 AMSL) a mesuré quant à lui environ 45 mm d'équivalent en eau liquide. Ces précipitations furent continues pendant près de 42 heures et engendrèrent une multitude de types de cristaux. Cette étude avait comme objectif d'analyser l'occurrence des différents types de cristaux à l'aide d'observations manuelles et d'évaluer la capacité du disdromètre laser-optique à discriminer les types en présence ainsi que l'accrétion de glace sur celles-ci.

L'analyse microphysique de l'événement a d'abord été précédé par une analyse des conditions synoptiques qui ont menés à la formation et la propagation du système qui a touché une bonne partie de la côte est Américaine. Les données réanalysées de ERA5 ont été utilisées pour l'ensemble de l'analyse synoptique pour différents champs physiques (Figure 8) à une résolution spatiale de  $0.25^\circ$  (~ 31 km) et une résolution temporelle de 1 h disponible sur 137 niveaux verticaux (Hersbach et al., 2020). Des profils de température, humidité et vent utilisant les données d'ERA5 ont également été réalisés afin de corroborer les observations manuelles quant à la phase des hydrométéores à la surface. Suite à l'analyse synoptique quelques points marquants ont pu en être tirés. Une dépression qui s'est formée près du Golfe du Mexique au sud de l'Alabama a puisé chaleur et humidité en se propageant sur la côte est Américaine pour se retrouver au-dessus de Montréal vers 1000 UTC le 6 février 2020 où le disdromètre laser-optique commençait à capter des particules solides. À environ 1100 UTC le 7 février 2020 suite à un déplacement lent de la dépression, les plus forts taux de précipitations associées à la phase mature du système dépressionnaire ont été enregistrés. Un transport d'humidité des tropiques combinés à l'advection d'air chaud et humide du Gulf Stream a permis de soutenir les 42 heures de précipitations consécutives.

Plusieurs types de précipitations solides ont été documentés à l'aide de macrophotographies sur le toit du PK-UQAM pendant toute la durée de l'événement. En effet, un montage expérimental ayant une caméra Nikon Digital D80 SLR (Figure 2c), une plaquette de collection en velours noir et un système de rail a permis de prendre 2169 macrophotographies des particules en présence durant l'événement. Un protocole d'analyse a été développé dans le cadre de cette étude pour analyser qualitativement chacune des macrophotographies. L'intérêt était porté sur la détection de différents types de cristaux de glace et de différents degrés de givrage. Entre autres à savoir quels étaient le ou les types en prépondérance(s), quels étaient le ou les type(s) en présence(s) qui étaient givrées afin de leur assigner un stage respectif entre 0 et 5 suivant la méthodologie de Mosimann et al. (1994).

Avec les informations qualitatives des particules identifiées sur les macrophotographies, il a été possible d'analyser l'évolution des types de cristaux lors de l'événements (Figure 10). On note l'occurrence de tous les types de cristaux principaux tels que, les dendrites, les plaques, les colonnes, les aiguilles, la neige roulée, le grésil et les irréguliers sont survenues (Figure 10a). Une analyse des types en prépondérances a permis de scinder les 42 heures de précipitation en 7 périodes distinctes (Figure 10b). La première période de l'événement était caractérisée par la présence de neige roulée et de dendrites fortement givrées pour ensuite transiter vers la deuxième période vers 1040 UTC le 6 février 2020 où l'occurrence de dendrites givrées était prépondérante avec des traces de neige roulée. À 1330 UTC le 6 février marquait le début de la troisième période où du grésil était majoritaire avec des traces de neige roulée. L'apparition graduelle de colonnes et d'aiguilles conjointement ou seules vers 1500 UTC marquaient la 4<sup>e</sup> et plus longue période de l'événement suivie d'un épisode de grésil débutant à 0700 UTC le 7 février 2020 associée au maximum de vitesse terminal des particules définissait la 5<sup>e</sup> période. À 1200 UTC le 7 février une transition vers la 6<sup>e</sup> période n'était pas marquée par l'occurrence d'aucun type de cristal prédominant, mais bien par l'occurrence de plusieurs types de cristaux pour ensuite faire place à l'apparition graduelle de dendrites non-givrées. La 7<sup>e</sup> et dernière période débuta ensuite vers 1430 UTC le 7 février marqué par la présence de dendrites et plaques non-givrées, et ce jusqu'à la fin de l'événement. Un autre fait marquant de l'événement étant la forte proportion de colonnes et d'aiguilles associées à la période 4, totalisant plus du tiers des particules de l'événement avec 16.9 % et 20.4 % respectivement (Figure 11).

De façon similaire, suite à l'analyse des macrophotographies il a été possible de relever trois phases distinctes de givrage durant l'événement (Figure 16). La première phase était caractérisée par un givrage moyen des particules d'environ 3 (densément givrée) sur l'échelle de Mossimann (1994) de 1000-1600 UTC le 6 février 2020. La deuxième phase s'est étalée de 1600 UTC le 6 février à 1400 UTC le 7 février, caractérisée par un givrage moyen des particules de 2 (modérément givrée). La troisième et dernière phase de 1400 UTC le 7 février à 0400 UTC le 8 février était marquée par un givrage nul. Le passage d'un givrage dense à nulle pour l'ensemble de la durée de l'événement montre l'amointrissement de la quantité de gouttelettes d'eaux surfondues dans la couche mixte en altitude. L'évolution du givrage de chacun des types de cristaux (Figure 17) a également permis de montrer la contribution de chacun des types de cristaux de glace durant l'événement. En effet, pour chacune des 7 périodes de l'événement, la contribution relative et variable de chacun des types a pu être explicitée.

L'analyse des propriétés des particules de précipitations telles que la taille et la vitesse de chute pour l'ensemble des types de cristaux de glace a montré que le disdromètre laser-optique ne semble pas sensible à discriminer les types. En réalisant les distributions de tailles pour chacun des types de cristaux, on note que de légères variations de tailles variant entre 0.68 mm et 0.81 mm associés aux colonnes et aux plaques, respectivement (Figure 14). Similairement, pour les vitesses terminales moyennes issues des distributions de vitesses de chacun des types de cristaux de glace variant entre 1.06 m s<sup>-1</sup> à 1.15 m s<sup>-1</sup> associées aux aiguilles et aux particules de grésils, respectivement.

En combinant les données sur la vitesse moyenne des particules mesurées par le disdromètre laser-optique et les données sur le givrage recueillies manuellement, une analyse de l'impact sur la vitesse de chute des particules a été menée. La corrélation globale sur tout l'événement entre la vitesse terminale de chute des particules et le degré de givrage était environ nulle. Malgré l'absence de signature du givrage de façon globale, il a été montré que la corrélation respective de ces variables pour chacune de ces périodes étaient parfois bonnes (Tableau 8). En effet, pour la période 2, on obtient de bonnes corrélations d'environ 0.53 associées à la présence de dendrites fortement givrées et de traces de neige roulées. La période 4 était marquée d'une corrélation de 0.48 associée à l'occurrence de colonnes et d'aiguilles de non-givrées à modérément givrées. Une analyse approfondie de la période 4 a été menée dû à sa longue durée et sa bonne corrélation avec le givrage.

L'évolution de la vitesse terminale (Figure 20b) et du givrage (Figure 20c) semble suivre la même tendance. En effet, les maxima et les minima concordent, ce qui montre la possible sensibilité du disdromètre laser-optique au givrage.

L'identification des particules en prépondérances durant une période de 10 minutes et la comparaison avec les prises de données par le disdromètre laser-optique a permis la réalisation des spectres de vitesses en fonction du diamètre pour chaque type de cristaux de glace (Figure 15). Il a été montré que le disdromètre laser-optique est très sensible aux petites particules qui se retrouvent en très fortes concentrations. Cette prépondérance de petites particules vient probablement modifier le signal du givrage pour les particules en dessous d'environ 1 mm de diamètre. En effet, il a été démontré dans cette étude que la sensibilité du givrage se trouve plutôt entre 1 et 4 mm de diamètre pour certains types de cristaux, telles que les colonnes, les aiguilles et les dendrites. Cette signature est mieux discernable pour les régimes de givrages 2 et 3 pour les dendrites (Figure 23b-c) et pour les régimes 1 et 2 pour les aiguilles (Figure 22a-b). L'impact de l'augmentation du givrage est bien discernable pour les colonnes (Figure 21a-c) où on remarque bien le rapprochement graduel de la courbe médiane (ligne pleine noire) vers la courbe théorique des colonnes longue tirée de Rasmussen et al. (1999). Finalement, lorsque les mesures sont divisées en deux catégories, neige sèche et neige mouillée/givrées, ces données sont généralement similaires aux vitesses de chute théorique de Rasmussen et al. (1999), en particulier la neige mouillée/givrée. Il est possible que la vitesse du vent horizontal ait augmenté la vitesse de chute mesurée des particules sèches, ce qui pourrait expliquer la différence entre les mesures et la théorie.

Enfin, quelques sources d'erreurs et limitations sont énumérées :

- L'analyse des macrophotographies a été réalisée de façon qualitative et ainsi les types de précipitations et le taux de givrage sont teintés d'un biais de subjectivité ;
- La prise de note à la manuelle rend l'étude difficilement reproductible et n'est pas appropriée pour analyser de longues périodes ;
- Les pas de temps associés aux macrophotographies ont été arrondis à la dizaine de minutes près afin de corroborer les sorties de données aux 10 minutes du disdromètre laser-optique.

Ainsi, un léger décalage quant aux types observés et les données du disdromètre laser-optique ont pu survenir à certains pas de temps;

- La vitesse du vent horizontale durant les précipitations pourrait impacter la mesure des dimensions et vitesses de chute des particules de précipitation.

## 6.2 Conclusion

Les types de cristaux de glace et le degré de givrage peuvent changer rapidement durant un évènement de précipitation. Leurs caractéristiques peuvent souvent être utiles à déterminer, en particulier lorsque les températures sont proches de 0°C ou encore pour estimer l'efficacité de collecte d'une jauge de précipitation (Thériault et al. 2012). L'évènement qui s'est déroulé du 6 au 8 février 2020 dura 42 h consécutif a permis de récolter une base de données d'observations substantielles avec plus de 2000 macrophotographies et plusieurs instruments déployés.

Cette étude avait pour but d'analyser les caractéristiques microphysiques des précipitations solides et d'évaluer les mesures automatiques du disdromètre laser-optique. En particulier, nous avons démontré qu'il était possible d'identifier certains des différents types de cristaux et le degré de givrage à l'aide des mesures automatiques. Le disdromètre laser-optique semble être en mesure de capter la signature du givrage pour les colonnes, les aiguilles et les dendrites pour certains régimes de givrage pour des diamètres se trouvant entre 1 et 4 mm de diamètre. En revanche, le disdromètre laser-optique semble avoir de la difficulté à mesurer la signature des différents types de cristaux quant à leurs caractéristiques telles que la taille et les vitesses de chute.

Les facteurs mentionnés plus haut ont permis une meilleure compréhension de la capacité du disdromètre laser-optique se trouvant sur le toit du PK-UQAM à évaluer les types de précipitations et une plus ample connaissance de l'influence du givrage sur les particules de glaces. L'étude menée a également permis de mieux connaître les limitations liées à l'instrument dans la catégorisation des précipitations solides.

Dans le cadre de cette étude, l'application du protocole d'analyse des macrophotographies n'a été faite que sur un seul évènement météorologique. Il serait pertinent de généraliser le protocole à

plusieurs événements pour développer une plus ample base de données corroborant observations manuelles et données automatiques du disdromètre laser-optique. Il serait judicieux d'automatiser l'analyse des macrophotographies avec un algorithme qui cataloguerait les types en présence et leur degré de givrage. Cette automatisation nous permettrait d'analyser plus d'événements en beaucoup moins de temps. Ainsi, avec davantage de données, il serait possible de produire de nouvelles courbes théoriques décrivant des types de cristaux de glace. De plus, sachant que le vent horizontal affecte les mesures automatiques, il serait utile de placer l'instrument dans un bouclier (e.g. Alter simple, double ou *Double Fence Intercomparison Reference*, DFIR) ou encore développer un filtre pour ajuster les données en fonction de la vitesse de vent. Munir la station d'un instrument avec un imageur tel qu'un 2-DVD serait fort utile pour des études futures.

Pour conclure, la complexité dans la mesure et la quantification des particules de précipitations rend la caractérisation des particules de précipitations solides difficiles. Notre étude a permis de faire ressortir les limitations et les capacités du disdromètre laser-optique à déterminer les caractéristiques des précipitations, en particulier le degré de givrage. Davantage de travaux de recherche seront nécessaires afin de développer des méthodes de mesures de type de cristaux de glace avec des appareils de mesures automatiques.





## ANNEXE A

### FILTRE SUR LES PARTICULES DU DISDROMÈTRE LASER-OPTIQUE

La présence de particule très rapide induit du bruit dans l'interprétation des données de la distribution des diamètres et des vitesses du disdromètre laser-optique. On remarque qu'en appliquant un filtre retirant les intervalles contenant moins de 2 particules qu'une bonne fraction des spectres est filtrée (Figure 25). Comparativement aux distributions sans filtre (Figure 12), on remarque que le spectre de valeur pour les diamètres (Figure 25a) et les vitesses (Figure 25b) sont plus restreints. Les pics de diamètres maximums oscillent autour de 5 mm avec seulement deux pics d'occurrences de particules au-dessus près de 10 mm en comparaison avec 22 mm pour le spectre sans filtre. Pour les vitesses de chute, les pics oscillent autour de 6 m s<sup>-1</sup> avec quelques occurrences près de 8 m s<sup>-1</sup> en comparaison avec 12 m s<sup>-1</sup> pour le spectre sans filtre (Figure 12b). Similairement pour les filtres de 5 particules (Figure 26) et 10 particules (Figure 27), on remarque que les gammes de valeurs oscillent à travers de plus petits intervalles. Pour les diamètres, on remarque que les valeurs oscillent entre environ 0.25 et 5 mm (Figure 26a) pour le filtre à 5 particules et entre environ 0.25 et 3.5 mm (Figure 27a) pour le filtre à 10 particules. Pour les diamètres, on remarque que les valeurs oscillent entre environ 0.3 et 6 m s<sup>-1</sup> (Figure 26b) pour le filtre à 5 particules et entre environ 0.3 et 5 m s<sup>-1</sup> (Figure 27b) pour le filtre à 10 particules.

Ainsi appliquer des filtres sur le nombre minimal de particules par intervalle peut être pertinent à des fins d'interprétation et de représentation. Elle permet de mieux distinguer le signal du bruit.

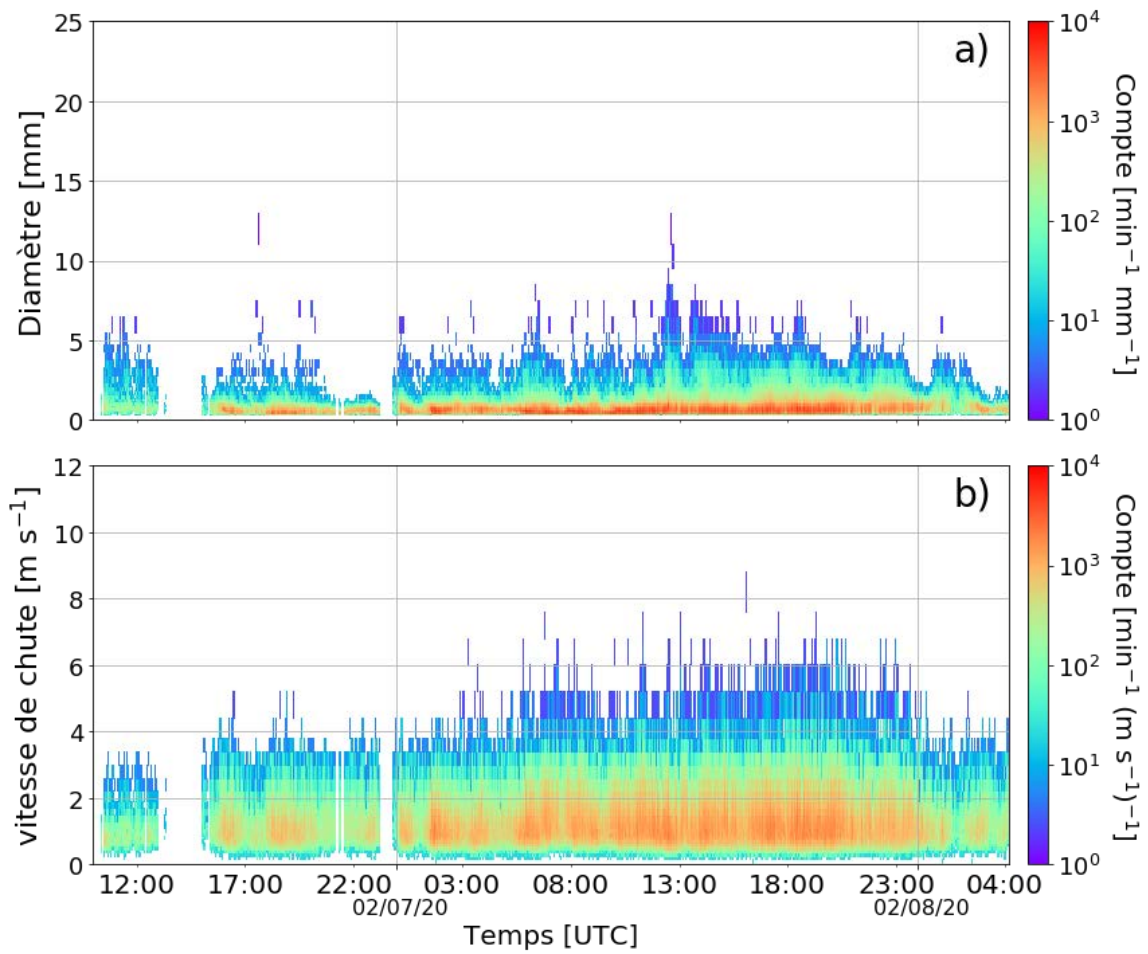


Figure 25. En couleur est représenté l'évolution temporelle du compte des particules normalisé avec un filtre à 2 particules pour les différentes gammes de : a) diamètres [mm] et b) de vitesses [ $m s^{-1}$ ].

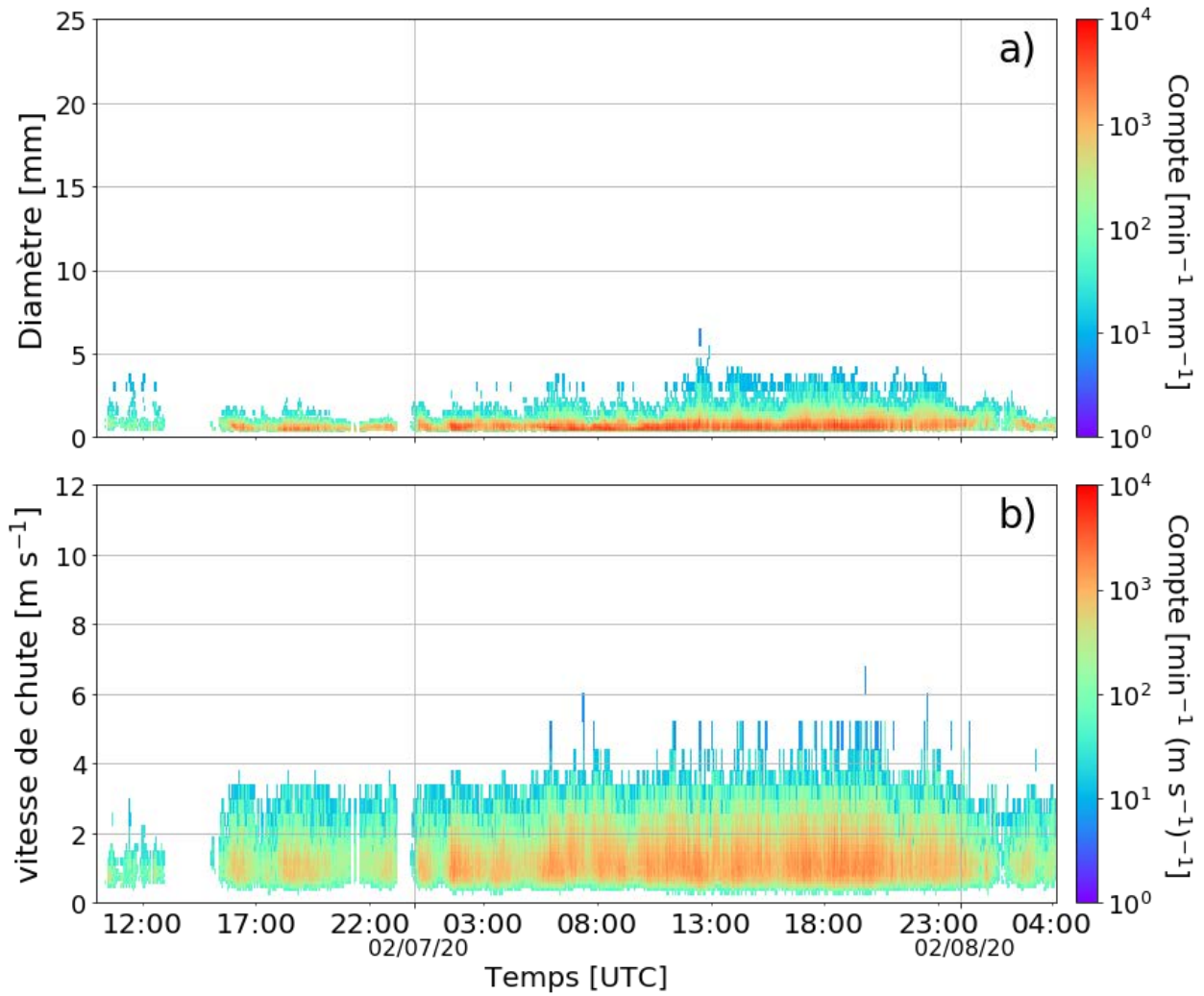


Figure 26. En couleur est représenté l'évolution temporelle du compte des particules normalisé avec un filtre à 5 particules pour les différentes gammes de : a) diamètres [mm] et b) de vitesses [ $m\ s^{-1}$ ].

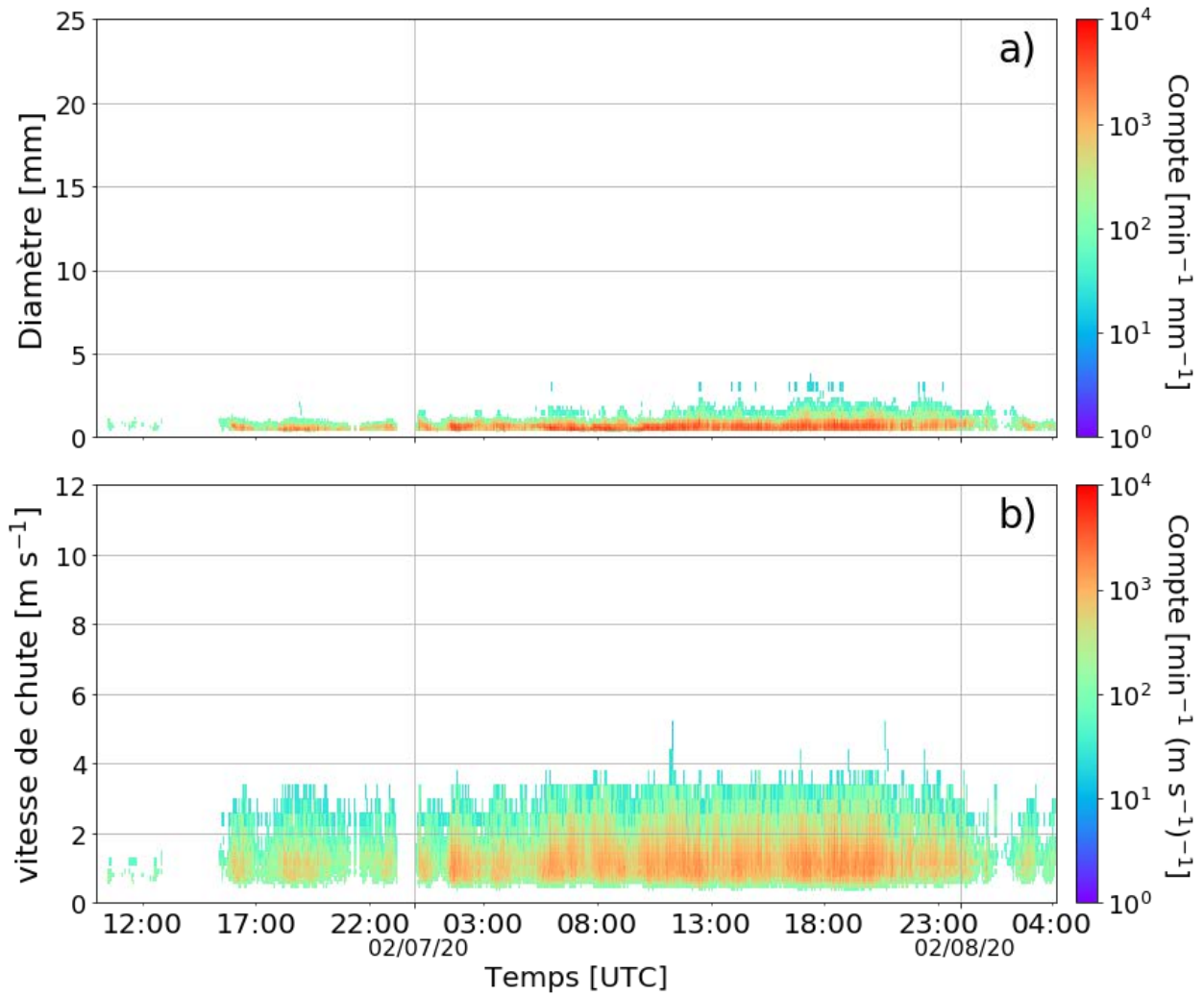


Figure 27. En couleur est représenté l'évolution temporelle du compte des particules normalisé avec un filtre à 10 particules pour les différentes gammes de : a) diamètres [mm] et b) de vitesses [m s<sup>-1</sup>].

## ANNEXE B

### IMPACT DE LA VITESSE DU VENT SUR LES MESURES DU DISDROMÈTRE

Les vitesses de chute des dendrites et des plaques observées au sol vers la fin de l'événement (Période 7, Figure 10b) ont été sujettes à plus ample réflexion quant à l'occurrence d'aussi grandes vitesses de chutes. Il est connu que la vitesse du vent horizontal influence la captation des particules par le disdromètre laser-optique et des jauges de divers instruments de mesures des précipitations (Gualco et al. 2021). En effet, le vent horizontal peut introduire des erreurs sur la mesure des vitesses de chutes des particules et peu devenir la principale force externe qui dicte la vitesse mesurée par le disdromètre laser-optique.

Durant la période 7, la corrélation entre la vitesse horizontale et la vitesse terminale moyenne des particules est de 0.62. Cette corrélation suggère l'influence du vent sur la mesure des vitesses de chutes par le disdromètre. Vers 0800 UTC le 7 février 2020, lorsque la vitesse du vent horizontale commence à augmenter graduellement au-dessus de  $4 \text{ m s}^{-1}$  pour atteindre un maximum à 1900 UTC le 7 février 2020, la différence entre la vitesse de chute mesurée par le disdromètre laser-optique et le MRR2 commence à devenir plus ample qu'au début de l'événement (Figure 28). Cette différence entre la vitesse mesurée est maximale entre 1900-2200 UTC le 7 février 2020 atteignant des différences jusqu'à un peu plus de  $1 \text{ m s}^{-1}$ . En analysant l'impact de la vitesse du vent horizontale sur la déviation de tendance entre les courbes des deux niveaux du MRR et le disdromètre laser-optique, on obtient des corrélations de 0.66. Il existe donc une forte corrélation entre la vitesse du vent horizontale et l'écart des vitesses mesurées entre le disdromètre laser-optique et le MRR2.

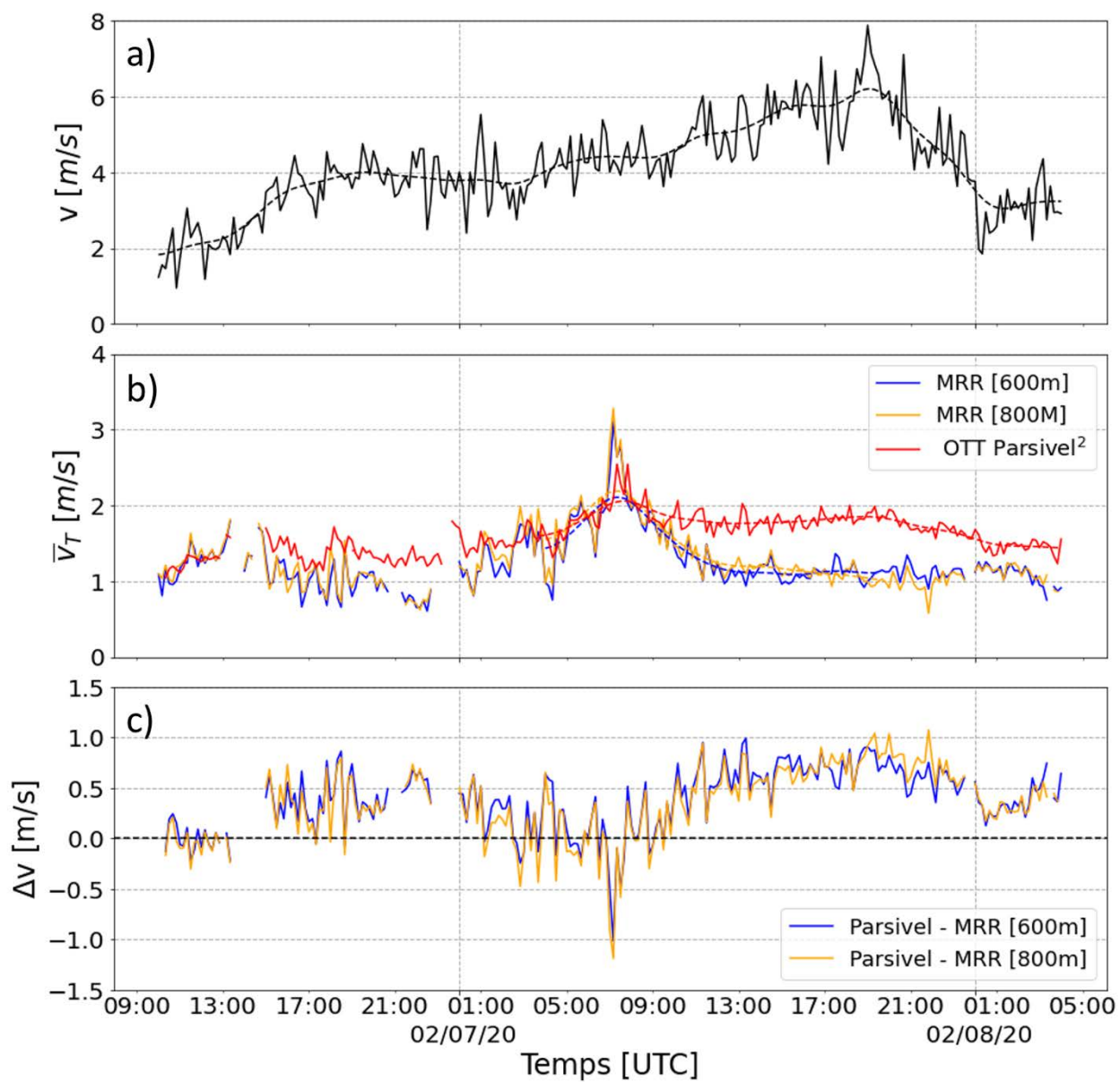


Figure 28. Évolution temporelle de : a) vitesse du vent à la surface (2 m + 75 m AMSL), b) vitesse terminale moyenne des particules mesurées par le disdromètre laser-optique (ligne rouge), vitesse de chute mesurée par le Micro Rain Rada (MRR) à 600 m (ligne bleue) et à 800 m (ligne orange) et c) la différence sur la mesure de la vitesse de chute entre le disdromètre laser-optique.

## ANNEXE C

### ANALYSE DU GIVRAGE

Une analyse de l'impact des dendrites et des plaques non-givrées durant la période 7 sur la représentation de la médiane par rapport à la neige sèche et mouillée/givrée est analysée. Cette période est associée avec des particules qui tombent plus rapidement, possiblement à cause de la vitesse du vent (Annexe B).

La relation vitesse-diamètre de la neige sèche est impactée par les vitesses de chute des dendrites et des plaques observées durant la période 7 (Figure 29). En retirant les plaques et les dendrites de la période 7, on remarque que la courbe médiane se rapproche de celle de la neige mouillée/givrée pour des diamètres supérieurs à environ 2.5 mm (Figure 29a) par rapport aux données sans filtre (Figure 24). La neige mouillée reste bien représentée par la courbe théorique de la neige mouillée de Rasmussen et al. (1999).

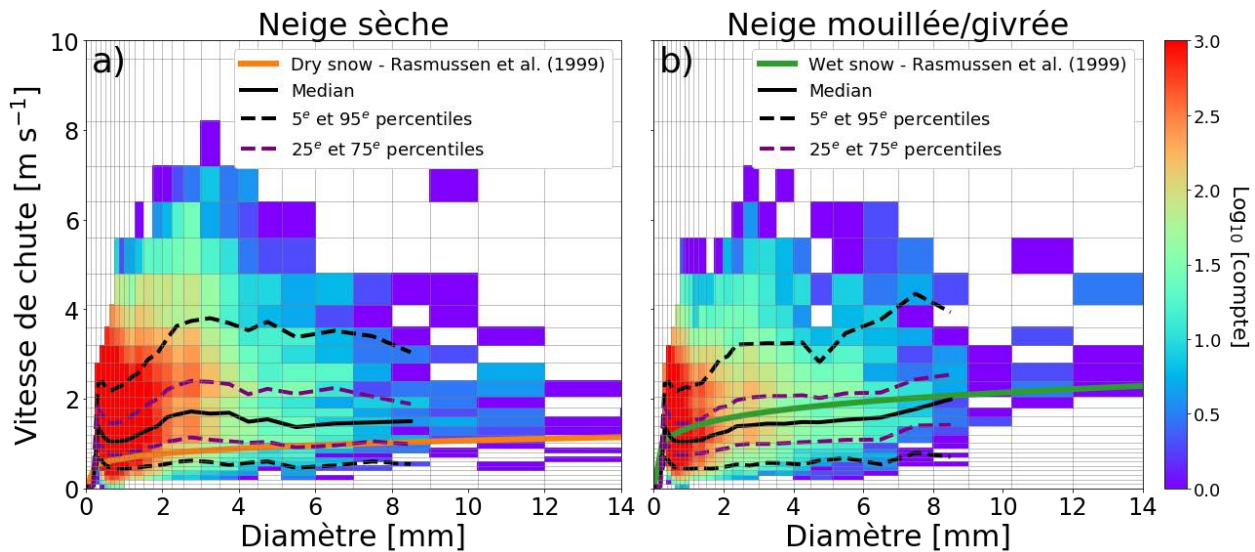


Figure 29. Spectres de vitesses en fonction du diamètre pour deux régimes de givrage en retirant la présence des plaques et dendrites ayant des vitesses de chute élevées : a) la neige sèche contient les particules non givrées et au stage 2 et b) la neige mouillée/givrée contient les stages de givrage de 3 à 5. Les courbes de la neige sèche (ligne pleine orange) et de la neige mouillée (ligne pleine verte) sont représentées en a) et en b), respectivement tirées de Rasmussen et al. (1999). La courbe noire pleine représente la médiane de chacune des distributions. Les courbes

pointillées noires représentent les 5<sup>e</sup> et 95<sup>e</sup> percentiles et les courbes pointillées mauves les 25<sup>e</sup> et 75<sup>e</sup> percentiles.

Si on varie les taux de givrage utilisés pour la neige sèche et mouillée/givrée (Figure 30a,b), on remarque peu de différences entre les deux taux de givrage (Figure 24a,b). Néanmoins, on obtient des résultats similaires lorsqu'on filtre les dendrites et les plaques de la période 7. En comparant Figure 30a et Figure 31a, on remarque qu'avec le filtre, la médiane près de la courbe de la neige mouillée/givrée à partir de 4.25 mm. Les Figure 30b et Figure 31b restent inchangées et la distribution est bien représentée par la courbe théorique de la neige mouillée sur l'ensemble de la distribution.

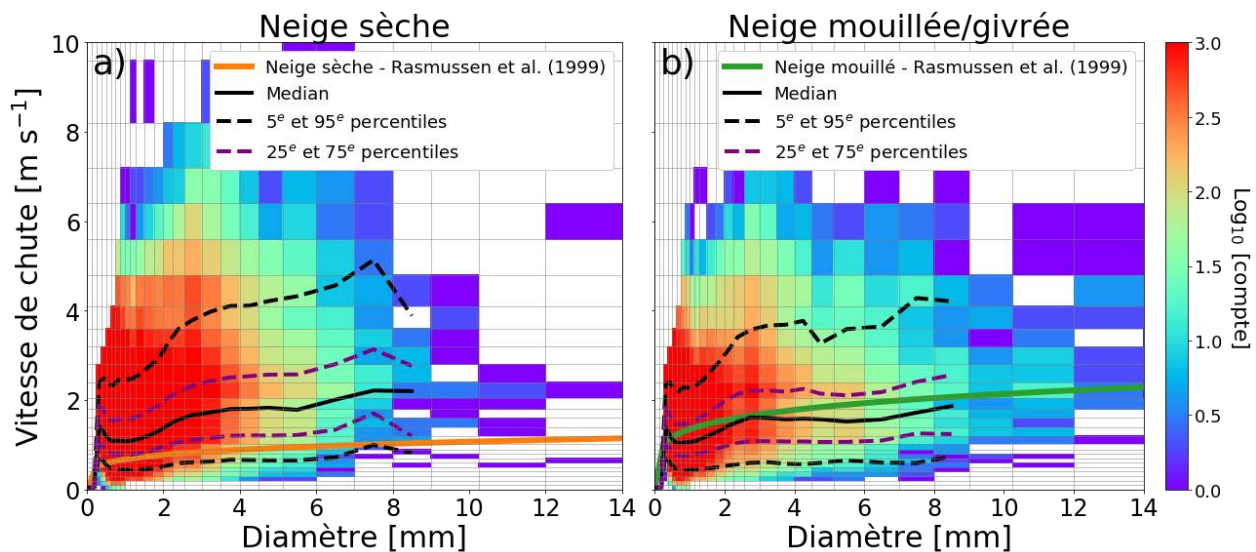


Figure 30. Spectres de vitesses en fonction du diamètre pour deux régimes de givrage : a) la neige sèche contient les particules non givrées et au stage 1 et b) la neige mouillée/givrée contient les stages de givrage de 2 à 5. Les courbes de la neige sèche (ligne pleine orange) et de la neige mouillée (ligne pleine verte) sont représentées en a) et en b), respectivement tirées de Rasmussen et al. (1999). La courbe noire pleine représente la médiane de chacune des distributions. Les courbes pointillées noires représentent les 5<sup>e</sup> et 95<sup>e</sup> percentiles et les courbes pointillées mauves les 25<sup>e</sup> et 75<sup>e</sup> percentiles.



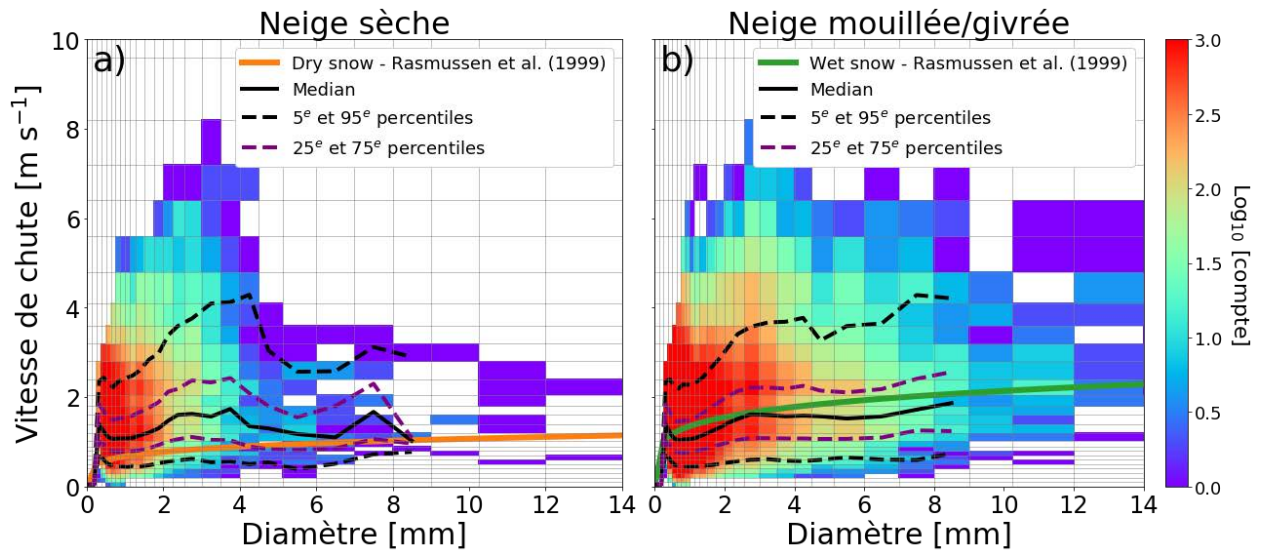


Figure 31. Spectres de vitesses en fonction du diamètre pour deux régimes de givrage en retirant la présence des plaques et dendrites ayant des vitesses de chute élevées : a) la neige sèche contient les particules non givrées et au stage 1 et b) la neige mouillée/givrée contient les stages de givrage de 2 à 5. Les courbes de la neige sèche (ligne pleine orange) et de la neige mouillée (ligne pleine verte) sont représentées en a) et en b), respectivement tirées de Rasmussen et al. (1999). La courbe noire pleine représente la médiane de chacune des distributions. Les courbes pointillées noires représentent les 5<sup>e</sup> et 95<sup>e</sup> percentiles et les courbes pointillées mauves les 25<sup>e</sup> et 75<sup>e</sup> percentiles.



## RÉFÉRENCES

- Abraham, F. F. (1970). Functional dependence of drag coefficient of a sphere on Reynolds number. *The Physics of Fluids*, 13(8), 2194-2195.
- Andreae, M. O.; Rosenfeld, D. (2008). Aerosol-Cloud-Precipitation Interactions. Part 1. the Nature and Sources of Cloud-Active Aerosols. *Earth-Science Reviews* 2008, 89 (1-2), 13-41 DOI: 10.1016/j.earscirev.2008.03.001.
- Atlas, D., & Ulbrich, C. W. (1977). Path-and area-integrated rainfall measurement by microwave attenuation in the 1-3 cm band. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 16(12), 1322-1331
- Bacon, N. J., Swanson, B. D., Baker, M. B., & Davis, E. J. (1998). Breakup of levitated frost particles. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D12), 13763-13775.
- Barthazy, E., & Schefold, R. (2006). Fall velocity of snowflakes of different riming degree and crystal types. *Atmospheric research*, 82(1-2), 391-398.
- Battaglia, A., Rustemeier, E., Tokay, A., Blahak, U., & Simmer, C. (2010). PARSIVEL snow observations: A critical assessment. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27(2), 333-344.
- Battan, L. J. (1973). *Radar observation of the atmosphere* (No. 04; QC973. 5, B3.).
- Beard, K. V. (1992). Ice initiation in warm-base convective clouds: An assessment of microphysical mechanisms. *Atmospheric research*, 28(2), 125-152.
- Bergeron, T. (1935). On the physics of clouds and precipitation. *Proc. 5th Assembly UGGI, Lisbon, Portugal, 1935*, 156-180.
- de Boer, G., Eloranta, E. W., & Shupe, M. D. (2009). Arctic Mixed-Phase Stratiform Cloud Properties from Multiple Years of Surface-Based Measurements at Two High-Latitude Locations, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 66(9), 2874-2887.
- Brandes, E. A., Ikeda, K., Zhang, G., Schönhuber, M., & Rasmussen, R. M. (2007). A statistical and physical description of hydrometeor distributions in Colorado snowstorms using a video disdrometer. *Journal of applied meteorology and climatology*, 46(5), 634-650.
- Brandes, E. A., Ikeda, K., Thompson, G., & Schönhuber, M. (2008). Aggregate terminal velocity/temperature relations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(10), 2729-2736.
- Brewer, A. W., & Palmer, H. P. (1949). Condensation processes at low temperatures, and the production of new sublimation nuclei by the splintering of ice. *Nature*, 164(4164), 312-313.

Cao, Q., Zhang, G., Brandes, E., Schuur, T., Ryzhkov, A., & Ikeda, K. (2008). Analysis of video disdrometer and polarimetric radar data to characterize rain microphysics in Oklahoma. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(8), 2238-2255.

Cortinas Jr, J. V., Bernstein, B. C., Robbins, C. C., & Strapp, J. W. (2004). An analysis of freezing rain, freezing drizzle, and ice pellets across the United States and Canada: 1976–90. *Weather and Forecasting*, 19(2), 377-390.

Dobrowolski, A. B. (1903). *La neige et le givre* (Vol. 3). Imprimerie J.-E. Buschmann.

Fabry, F., & Zawadzki, I. (1995). Long-term radar observations of the melting layer of precipitation and their interpretation. *Journal of the atmospheric sciences*, 52(7), 838-851.

Fletcher, N. H., (1962): *Physics of Rain Clouds*. Cambridge University Press, 386 pp.

Field, P. R., Lawson, R. P., Brown, P. R., Lloyd, G., Westbrook, C., Moisseev, D., ... & Sullivan, S. (2017). Secondary ice production: Current state of the science and recommendations for the future. *Meteorological Monographs*, 58, 7-1.

Findeisen, W. (1938). Kolloid-meteorologische Vorgänge bei Neiderschlags-bildung. *Meteor. Z*, 55, 121-133.

Findeisen, W., & Findeisen, E. (1943). Investigations on the ice splinter formation on rime layers (A contribution to the origin of storm electricity and to the microstructure of cumulonimbi). *Meteor. Z*, 60(5), 145-154.

Garrett, T.J., Bair, E.H., Fallgatter, C., Shkurko, K., Davis, R.E., & Howlett, D. (2012). The Multi-Angle Snowflake Camera.

Gibson, S. R., and R. E. Stewart, 2007: Observations of ice pellets during a winter storm. *Atmos. Res.*, 85 (1), 64–76.

Glickman, T. S. (2000), *Glossary of Meteorology*, 2nd ed., Am. Meteorol. Soc., Boston, Mass.

Gualco, L. F., Campozano, L., Maisincho, L., Robaina, L., Muñoz, L., Ruiz-Hernández, J. C., ... & Condom, T. (2021). Corrections of Precipitation Particle Size Distribution Measured by a Parsivel OTT2 Disdrometer under Windy Conditions in the Antisana Massif, Ecuador. *Water*, 13(18), 2576.

Gunn, K. L. S., & Marshall, J. S. (1958). The distribution with size of aggregate snowflakes. *Journal of Atmospheric Sciences*, 15(5), 452-461.

Hallett, J., & Mason, B. J. (1958). The influence of temperature and supersaturation on the habit of ice crystals grown from the vapour. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 247(1251), 440-453.

- Hallett, J., & Mossop, S. C. (1974). Production of secondary ice particles during the riming process. *Nature*, 249(5452), 26-28.
- Harimaya, T., & Sato, M. (1989). Measurement of the riming amount on snowflakes. *Journal of Faculty of Science Hokkaido University*, 8(4), 355–366.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... & Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049.
- Hanesiak, J., Stewart, R., Painchaud-Niemi, D., Milrad, S., Liu, G., Vieira, M., ... & Ziolkowski, K. (2022). The Severe Multi-Day October 2019 Snow Storm Over Southern Manitoba, Canada. *Atmosphere-Ocean*, 1-23.
- Heymsfield, A. (1972). Ice crystal terminal velocities. *Journal of Atmospheric Sciences*, 29(7), 1348-1357.
- Heymsfield, A. J., & Kajikawa, M. (1987). An improved approach to calculating terminal velocities of plate-like crystals and graupel. *Journal of Atmospheric Sciences*, 44(7), 1088-1099.
- Heymsfield, A. J., & Sabin, R. M. (1989). Cirrus crystal nucleation by homogeneous freezing of solution droplets. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 46(14), 2252-2264.
- Hobbs, P. V., Chang, S., & Locatelli, J. D. (1974). The dimensions and aggregation of ice crystals in natural clouds. *Journal of geophysical Research*, 79(15), 2199-2206.
- Hobbs, P. V., & Rangno, A. L. (1985). Ice particle concentrations in clouds. *Journal of Atmospheric Sciences*, 42(23), 2523-2549.
- Holroyd, E. W. (1971). *The meso-and microscale structure of Great Lakes snowstorm bands: A synthesis of ground measurements, radar data, and satellite observations* (Doctoral dissertation, State University of New York at Albany, Department of Atmospheric Science).
- Ishizaka, M., Motoyoshi, H., Nakai, S., Shiina, T., Kumakura, T., & Muramoto, K. I. (2013). A new method for identifying the main type of solid hydrometeors contributing to snowfall from measured size-fall speed relationship. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 91(6), 747-762.
- Iwai, K. (1973). On the characteristic features of snow crystals developed along c-axis. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 51(6), 458-466.
- Kikuchi, K., Kameda, T., Higuchi, K., & Yamashita, A. (2013). A global classification of snow crystals, ice crystals, and solid precipitation based on observations from middle latitudes to polar regions. *Atmospheric research*, 132, 460-472.

- Klett, J. D. (1971). On the breakup of water drops in air. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 28(4), 646-647.
- Knight, N. C., & Heymsfield, A. J. (1983). Measurement and interpretation of hailstone density and terminal velocity. *Journal of atmospheric sciences*, 40(6), 1510-1516.
- Kobayashi, T. (1957). Experimental researches on the snow crystal habit and growth by means of a diffusion cloud chamber. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 35, 38-47.
- Kobayashi, T. (1958). On the habit of snow crystals artificially produced at low pressures. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 36(5), 193-208.
- Kobayashi, T. (1961). The growth of snow crystals at low supersaturations. *Philosophical Magazine*, 6(71), 1363-1370.
- Kruger, A., & Krajewski, W. F. (2002). Two-dimensional video disdrometer: A description. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(5), 602-617.
- Kuhn, T., & Vázquez-Martín, S. (2020). Microphysical properties and fall speed measurements of snow ice crystals using the Dual Ice Crystal Imager (D-ICI). *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(3), 1273-1285.
- Lamb, D.; Verlinde, J. *Physics and Chemistry of Clouds*; Cambridge Books Online; Cambridge University Press: Cambridge, 2011.
- Langmuir, I. (1948). The production of rain by a chain reaction in cumulus clouds at temperatures above freezing. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 5(5), 175-192.
- Leisner, T., Pander, T., Handmann, P., & Kiselev, A. (2014, July). Secondary ice processes upon heterogeneous freezing of cloud droplets. In *14th Conf. on Cloud Physics and Atmospheric Radiation*.
- Löffler-Mang, M., & Joss, J. (2000). An Optical Disdrometer for Measuring Size and Velocity of Hydrometeors, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 17(2), 130-139.
- Locatelli, J. D., & Hobbs, P. V. (1974). Fall speeds and masses of solid precipitation particles. *Journal of Geophysical Research*, 79(15), 2185-2197.
- Magarvey, R. H., & Geldart, J. W. (1962). Drop collisions under conditions of free fall. *Journal of Atmospheric Sciences*, 19(1), 107-113.
- Magono, C., 1953: On the growth of snowflakes and graupel. *Sci. Rep. Yokohama Nat. Univ., Sec. I*, No. 2, 18-40.
- Magono, C. (1960). Structure of snowfall revealed by geographic distribution of snow crystals. *Physics of Precipitation, American Geophys. Union*, 142-151.

- Magono, C., & Lee, C. W. (1966). Meteorological classification of natural snow crystals. *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University. Series 7, Geophysics*, 2(4), 321-335.
- Maahn, M., & Kollias, P. (2012). Improved Micro Rain Radar snow measurements using Doppler spectra post-processing. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5(11), 2661-2673.
- Marshall, J. S., & Palmer, W. M. K. (1948). THE DISTRIBUTION OF RAINDROPS WITH SIZE, *Journal of Atmospheric Sciences*, 5(4), 165-166.
- McFarquhar, G. M., Zhang, G., Poellot, M. R., Kok, G. L., McCoy, R., Tooman, T., ... & Heymsfield, A. J. (2007). Ice properties of single-layer stratocumulus during the Mixed-Phase Arctic Cloud Experiment: 1. Observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D24).
- Milton, J., Bourque, A. et Canada. Environnement Canada. Région Du Québec. Division Des Sciences Atmosphériques Et Enjeux Environnementaux. Compte-rendu Climatologique De La Tempête De Verglas De Janvier 1998 Au Québec Rapport Scientifique. Série Sur Les Extrêmes Climatiques Au Québec Q98-01. Ottawa: Environnement Canada, 1999.
- Mitchell, D. L., Zhang, R., & Pitter, R. L. (1990). Mass-dimensional relationships for ice particles and the influence of riming on snowfall rates. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 29(2), 153-163.
- Mitchell, D. L. (1996). Use of mass-and area-dimensional power laws for determining precipitation particle terminal velocities. *Journal of Atmospheric Sciences*, 53(12), 1710-1723.
- Moisseev, D., von Lerber, A., & Tiira, J. (2017). Quantifying the effect of riming on snowfall using ground-based observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122, 4019–4037.
- Morrison, H., van Lier-Walqui, M., Fridlind, A. M., Grabowski, W. W., Harrington, J. Y., Hoose, C., Korolev, A., Kumjian, M. R., Milbrandt, J. A., Pawlowska, H., Posselt, D. J., Prat, O. P., Reimel, K. J., Shima, S. I., van Dierenhoven, B., & Xue, L. (2020). Confronting the Challenge of Modeling Cloud and Precipitation Microphysics. *Journal of advances in modeling earth systems*, 12(8), e2019MS001689.
- Mosimann, L., Weingartner, E., & Waldvogel, A. (1994). An analysis of accreted drop sizes and mass on rimed snow crystals. *Journal of Atmospheric Sciences*, 51(11), 1548-1558.
- Mossop, S. C. (1985). Secondary ice particle production during rime growth: The effect of drop size distribution and rimer velocity. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 111(470), 1113-1124.
- Murray, B. J., O'sullivan, D., Atkinson, J. D., et al. (2012). Ice nucleation by particles immersed in supercooled cloud droplets. *Chemical Society Reviews*, 2012, vol. 41(19), p. 6519-6554.

- Nakaya, U., & Terada Jr, T. (1935). Simultaneous observations of the mass, falling velocity and form of individual snow crystals. *北海道帝國大學理學部紀要*, 1(7), 191-200.
- Nakaya, U., & Sekido, Y. (1938). General classification of snow crystals and their frequency of occurrence, *Hokkaido Imperial Univ. J. Fac. Sci., Ser. II I-9*, 234-264.
- Nakaya, U. (1954). *Formation of snow crystals* (Vol. 3). Snow, Ice and Permafrost Research Establishment, Corps of Engineers, US Army.
- Notaroš, B. M., Bringi, V. N., Kleinkort, C., Kennedy, P., Huang, G. J., Thurai, M., ... & Lee, G. (2016). Accurate characterization of winter precipitation using multi-angle snowflake camera, visual hull, advanced scattering methods and polarimetric radar. *Atmosphere*, 7(6), 81.
- Ono, A. (1969). The shape and riming properties of ice crystals in natural clouds. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 26(1), 138-147.
- Praz, C., Roulet, Y. A., & Berne, A. (2017). Solid hydrometeor classification and riming degree estimation from pictures collected with a Multi-Angle Snowflake Camera. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(4), 1335-1357.
- Pruppacher, H. R., Klett, J. D., & Wang, P. K. (1997). *Microphysics of clouds and precipitation*.
- Politovich, M. K., & Cooper, W. A. (1988). Variability of the supersaturation in cumulus clouds. *Journal of the atmospheric sciences*, 45(11), 1651-1664.
- Pomeroy, J. W., Stewart, R. E., & Whitfield, P. H. (2016). The 2013 flood event in the South Saskatchewan and Elk River basins: Causes, assessment and damages. *Canadian Water Resources Journal/Revue canadienne des ressources hydriques*, 41(1-2), 105-117.
- Rasmussen, R. M., Vivekanandan, J., Cole, J., Myers, B., & Masters, C. (1999). The estimation of snowfall rate using visibility. *Journal of Applied Meteorology*, 38(10), 1542-1563.
- Rango, A., Foster, J., Josberger, E. G., Erbe, E. F., Wergin, W. P., & Pooley, C. (2003). Rime and graupel: Description and characterization as revealed by low-temperature scanning electron microscopy. *Scanning: The Journal of Scanning Microscopies*, 25(3), 121-131.
- Rauber, R. M., Olthoff, L. S., Ramamurthy, M. K., & Kunkel, K. E. (2000). The relative importance of warm rain and melting processes in freezing precipitation events. *Journal of Applied Meteorology*, 39(7), 1185-1195.
- Rogers, D. C. (1973). *The aggregation of natural ice crystals*. University of Wyoming.
- Rogers, R. R., & Yau, M. K. (1989). *A short course of cloud physics*. Pergamon.



- Shaw, D., & Mason, B. J. (1955). XXIX. The growth of ice crystals from the vapour. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 46(374), 249-262.
- Smith, P. L. (1984). Equivalent radar reflectivity factors for snow and ice particles. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(8), 1258-1260.
- Stewart, R. E., & King, P. (1987). Freezing precipitation in winter storms. *Monthly Weather Review*, 115(7), 1270-1280.
- Stewart, R. E. (1992). Precipitation types in the transition region of winter storms. *Bulletin of the American meteorological society*, 73(3), 287-296.
- Stewart, R.E., Bachand, D.D., Dunkley, R., Giles, A.C., Lawson, B.D., Miller, S.T., Murphy, B.P., Parker, M.N., Paruk, B.J., & Yau, M.K. (1995). Winter storms over Canada. *Atmosphere-ocean*, 33, 223-247.
- Takahashi, T., Nagao, Y., & Kushiya, Y. (1995). Possible high ice particle production during graupel–graupel collisions. *Journal of the atmospheric sciences*, 52(24), 4523-4527.
- Thériault, J. M., Rasmussen, K. L., Fisico, T., Stewart, R. E., Joe, P., Gulpepe, I., ... & Isaac, G. A. (2014). Weather observations on Whistler Mountain during five storms. *Pure and Applied Geophysics*, 171(1), 129-155.
- Thériault, J. M., Rasmussen, R., Ikeda, K., & Landolt, S. (2012). Dependence of snow gauge collection efficiency on snowflake characteristics. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(4), 745-762.
- Thériault, J.M., Rasmussen, R., Smith, T., et al. (2012). A case study of processes impacting precipitation phase and intensity during the vancouver 2010 winter olympics. *Weather and Forecasting*, 27(6), 1301–1325.
- Vali, G., DeMott, P. J., Möhler, O., & Whale, T. F. (2015). A proposal for ice nucleation terminology. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(18), 10263-10270.
- Vardiman, L. (1978). The generation of secondary ice particles in clouds by crystal–crystal collision. *Journal of Atmospheric Sciences*, 35(11), 2168-2180.
- Vázquez-Martín, S., Kuhn, T., & Eliasson, S. (2021). Shape dependence of snow crystal fall speed. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(10), 7545-7565.
- Warner, J. (1968). The supersaturation in natural clouds.
- Wegener, A. (1911). *Thermodynamik der atmosphäre*. JA Barth.
- Weickmann, H. K., 1949: Die Eisphase in der Atmosphäre. *Ber. Deut. Wetterd.*, No. 6, 54 pp.

Wilson, C. T. R. (1900). On the comparative efficiency as condensation nuclei of positively and negatively charged ions. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series a, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 193, 289–308.

Young, K. C. (1974). The role of contact nucleation in ice phase initiation in clouds. *Journal of Atmospheric Sciences*, 31(3), 768-776.

Yuter, S. E., Kingsmill, D. E., Nance, L. B., & Löffler-Mang, M. (2006). Observations of precipitation size and fall speed characteristics within coexisting rain and wet snow. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 45(10), 1450-1464.

Zikmunda, J., & Vali, G. (1972). Fall patterns and fall velocities of rimed ice crystals. *Journal of Atmospheric Sciences*, 29(7), 1334-1347.